



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

Accordo di Programma MSE/ENEA 2012-2014

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività



Febbraio 2014

Accordo di Programma MSE-ENEA 2012-14

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
Risultati del primo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

con i contributi di

*Mario Conte, Vito Pignatelli, Paola Delli Veneri, Domenico Mazzei, Gianmaria Sannino,
Stefano Giammartini, Felice De Rosa, Mariano Tarantino, Aldo Pizzuto, Antonio Cucchiaro,
Ilaria Bertini, Gaetano Fasano, Nicolandrea Calabrese, Antonino Genovese*

2014 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-298-5



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Accordo di Programma MSE-ENEA 2012-14

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del primo anno di attività

A cura di

Marina Ronchetti

Con i contributi di

M. Conte, V. Pignatelli, P. Delli Veneri, D. Mazzei, G. Sannino, S. Giammartini, F. De Rosa,
M. Tarantino, A. Pizzuto, A. Cucchiaro, I. Bertini, G. Fasano, N. Calabrese, A. Genovese

Febbraio 2014

Presentazione.....	7
<i>GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE</i>	
Sistemi avanzati di accumulo di energia	9
<i>Responsabile scientifico: Mario Conte</i>	
<i>PRODUZIONE DI ENERGIA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE</i>	
Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili.....	87
<i>Responsabile scientifico: Vito Pignatelli</i>	
Energia elettrica da fonte solare	149
<i>Responsabili scientifici: Paola Delli Veneri, Domenico Mazzei</i>	
Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso.....	225
<i>Responsabile scientifico: Gianmaria Sannino</i>	
Cattura e sequestro della CO ₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili	249
<i>Responsabile scientifico: Stefano Giammartini</i>	
Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione	321
<i>Responsabili scientifici: Felice de Rosa, Mariano tarantino</i>	
Attività di fisica della fusione complementari a ITER	371
<i>Responsabile scientifico: Aldo Pizzuto</i>	
<i>RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA</i>	
Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi.....	401
<i>Responsabile scientifico: Ilaria Bertini</i>	
Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico.....	453
<i>Responsabile scientifico: Gaetano Fasano</i>	
Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione.....	489
<i>Responsabile scientifico: Nicolandrea Calabrese</i>	
Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità	569
<i>Responsabile scientifico: Antonino Genovese</i>	
Elenco documenti tecnici	615
Abbreviazioni ed acronimi.....	627

Il presente volume illustra i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (28 Università con 53 dipartimenti coinvolti) e le società partecipate Sotacarbo ed FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella prima annualità (Piano Annuale di Realizzazione 2012) dell'Accordo di Programma 2012-14 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico stipulato in data 4 marzo 2013.

La Ricerca di Sistema Elettrico prevede, come noto, sia temi di ricerca fondamentale che studi di carattere sistemico e prenormativo. Le attività sono finanziate attraverso un fondo (gestito dalla Cassa Conguaglio per il Settore Elettrico) alimentato dal gettito della componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene definito periodicamente dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas. Le attività di ricerca sono orientate alla promozione di un sistema energetico più sicuro ed efficiente, che favorisca il contenimento dei prezzi dell'energia elettrica per i consumatori e le imprese, che contribuisca allo sviluppo economico e sociale del Paese, che sviluppi tecnologie sempre più innovative, efficienti e competitive migliorando la qualità del servizio e diminuendo costi e impatto sull'ambiente.

I risultati tecnico-scientifici ottenuti sono a totale beneficio dell'utente del sistema elettrico nazionale, sono quindi interamente pubblici e vengono divulgati mediante appositi piani di diffusione.

Nell'annualità 2012 ENEA, all'interno delle tre aree prioritarie previste dall'attuale Piano Triennale 2012-14 sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ha attivato 11 progetti di ricerca, che tengono conto anche degli indirizzi della Strategia Energetica Nazionale (SEN) e di quanto previsto a livello europeo dallo Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan).

- Nell'Area "Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico" sono state portate avanti attività finalizzate all'accumulo di energia elettrica, essenziali per la diffusione delle fonti rinnovabili caratterizzate da forte discontinuità temporale. Accanto a ricerche sui sistemi basati su celle al litio sono state avviate attività su altre tipologie di accumulo elettrochimico (sistemi ad alta temperatura e redox a flusso) e su sistemi basati su magneti superconduttori.
- Nell'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente" sono state svolte ricerche su messa a punto e dimostrazione su scala significativa di sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse, sia mediante la produzione di biogas, da utilizzare per la co-generazione di elettricità e calore in sistemi decentralizzati di piccola-media taglia o, previo un opportuno trattamento per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione del gas, sia attraverso lo sviluppo di sistemi di cogenerazione pre-commerciali ad elevato rendimento basati sulla tecnologia della gassificazione o della combustione in dispositivi innovativi per disporre di vettori energetici ad alta temperatura; sul fotovoltaico avanzato (film sottili innovativi, celle organiche) e su sistemi basati sulla tecnologia del solare termodinamico; sulla produzione di energia da impianti che sfruttano il moto ondoso e le correnti marine; sullo studio delle tecnologie di cattura e sequestro della CO₂ (CCS) come strada per un utilizzo sostenibile dei combustibili fossili.

Sono proseguite le attività sul nuovo nucleare da fissione, ora concentrate su due linee di attività principali: studi di sicurezza sugli impianti nucleari, svolte principalmente in un contesto internazionale, e nucleare di IV Generazione (tecnologia dei reattori veloci refrigerati a piombo), per tenere conto delle necessità di ricerca nel settore, alla luce del dopo Fukushima e degli indirizzi di politica nazionale e comunitaria. Relativamente al nucleare da fusione, per rispettare gli impegni assunti dal Governo italiano a livello internazionale, procedono le attività svolte a supporto del programma ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) per la realizzazione di una macchina tokamak da installare in Giappone. Il progetto include le attività sul programma "Broader Approach", che consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono realizzazioni prototipiche di alto contenuto tecnologico, e in misura minore sul programma FAST, il nuovo esperimento di fusione che ha lo scopo di preparare gli scenari operativi di ITER.

- Nell'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica" sono state svolte attività orientate al risparmio negli usi finali, con ricerche sull'efficienza energetica nei settori dei servizi, industria e civile e della climatizzazione con la realizzazione di prototipi sperimentali. È stato avviato un nuovo progetto che riguarda interventi per l'efficienza energetica di edifici del patrimonio immobiliare pubblico. Il progetto si propone di sviluppare modelli e strumenti per la diagnosi energetica, definire modelli di intervento di tecnologie innovative per la riqualificazione energetica degli edifici e per renderli in grado di rispondere ai requisiti imposti dalle direttive europee.

Per quanto concerne, infine, la mobilità elettrica sono stati effettuati studi e ricerche su componenti e strutture di alimentazione innovative per la ricarica rapida di veicoli elettrici e attività di ricerca di base attinenti lo sviluppo di processi di produzione e caratterizzazione di componenti strutturali innovativi per la riduzione del peso dei veicoli a trazione elettrica.

Nel volume per ognuno degli undici progetti di ricerca viene riportata una descrizione dell'attività svolta e dei principali risultati raggiunti. Maggiori dettagli possono essere acquisiti dal sito web ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico), che consente di accedere alla documentazione prodotta nelle diverse annualità dell'Accordo di Programma.

Vincenzo Porpiglia
Responsabile Unità di Progetto
Ricerca di Sistema Elettrico

Sistemi avanzati di accumulo di energia

I sistemi di accumulo sono ormai ritenuti una tecnologia portante delle future reti elettriche. È accertata la possibilità per sistemi di accumulo di svolgere numerose funzioni tecnicamente ed economicamente necessarie alla prevista evoluzione del sistema di generazione e distribuzione nonché per gli usi finali dell'energia elettrica, che ormai contengono quote crescenti di fonti energetiche rinnovabili, per loro natura intermittenti, e che puntano ad una maggiore intelligenza del sistema sostanzialmente incrementando la generazione distribuita (GD) e le soluzioni smart. Le politiche a supporto dello sviluppo delle smart grid prevedono, infatti, l'utilizzo di sistemi di gestione e controllo sempre più sofisticati ed interattivi, aumentando il colloquio tra fornitore ed utilizzatore, per rispondere ad una maggiore richiesta di qualità della fornitura di energia che ha notevoli impatti economici sui processi industriali, la necessità di garantire un maggiore collegamento delle fasi di produzione con quelle della domanda di energia anche nell'ottica di un mercato aperto e libero nella commercializzazione dell'energia elettrica, ed affidando alle tecnologie dell'accumulo il compito non secondario di aumento della flessibilità e governabilità delle reti.

Il progetto pone l'attenzione sui sistemi di accumulo per applicazioni alla generazione distribuita ed alle smart grid, con prevalenza per l'accumulo elettrochimico (con sistemi a base di litio ma anche con sistemi redox a flusso ed ad alta temperatura) e quello dell'idrogeno, con l'obiettivo di accelerare la ricerca di soluzioni più rapidamente applicabili ed, in alcuni casi particolarmente interessanti e competitive, valutando anche la fattibilità tecnica ed anche economica di soluzioni completamente innovative (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES, e sistemi integrati per la generazione, l'accumulo e l'utilizzo dell'idrogeno).

I sistemi di accumulo sono già utilmente usati in diverse applicazioni nelle reti elettriche, con funzioni già note (power quality, peak shaving, regolazioni di tensione o frequenza, ecc.), mentre un più ampio uso delle fonti rinnovabili e della generazione distribuita, in genere, può portare numerosi vantaggi aggiuntivi dall'integrazione dell'attuale uso centralizzato e di grande taglia (centinaia di MW) dei sistemi di accumulo con quello futuro di sistemi distribuiti lungo l'intera rete elettrica comprensiva delle parti relative alla trasmissione, distribuzione ed uso finale. Il pieno sviluppo di queste potenzialità dei sistemi di accumulo richiede però la soluzione di diversi problemi, di natura regolamentare ed organizzativa, e di opportunità di ricerca e sviluppo per rendere i vari metodi di accumulo (pompaggio d'acqua, sistemi ad aria compressa - CAES, magneti superconduttori, accumulo dell'idrogeno, accumulo termico ed accumulo elettrochimico) sempre più rispondenti alle necessità specifiche della rete elettrica.

Per le applicazioni di piccola e media taglia, particolarmente interessanti per favorire la trasformazione delle reti elettriche con un crescente contributo delle fonti rinnovabili non programmabili, questo progetto concentra le attività sui sistemi di accumulo alternativi a quelli convenzionali (basati principalmente sul pompaggio di acqua). In particolare, le attività di ricerca e sviluppo riguardano sistemi di accumulo mirate alle specifiche funzioni richieste dal sistema elettrico nazionale, tenendo anche nel dovuto conto delle iniziative avviate in ambito europeo all'interno di piattaforme (come Smart Grid) ed alleanze tecnologiche (come l'European Energy Research Alliance - EERA) e degli associati programmi di ricerca e sviluppo della Commissione Europea all'interno di Horizon 2020. Queste attività mirano a soddisfare gli indirizzi strategici esplicitamente indicati nel Piano Triennale del Ministero dello Sviluppo Economico (MSE) che sulle specifiche tematiche della "Generazione distribuita, reti attive e sistemi di accumulo" prevede che: *"Le politiche di incentivazione della produzione di energia da fonti rinnovabili hanno determinato una crescita impetuosa della potenza installata. Nel settore eolico si è passati dai 1.600 MW del 2005 ai 6.500 MW del 2011, in quello fotovoltaico da 87 MW nel 2007 a circa 12.000 MW nel 2011, con previsioni di ulteriore crescita negli anni a venire. Gli impianti per la produzione di energia da biomasse sono invece cresciuti in modo più contenuto, arrivando a circa 2.500 MW installati nel 2011. Si tratta di impianti di taglia piccola o medio-piccola, distribuiti sul territorio, che, con l'eccezione delle biomasse, producono energia in modo discontinuo e non programmabile, caratteristiche che impongono tanto un adeguamento della rete elettrica che l'utilizzazione di sistemi di accumulo dell'energia. La diffusione della generazione distribuita è legato allo sviluppo di reti attive (smart grids), che possono accogliere flussi bidirezionali di energia e permettere l'interazione tra produttori e consumatori, da perseguire in coerenza con le numerose iniziative nazionali ed europee. Una condizione abilitante per la diffusione della generazione distribuita e lo sviluppo delle reti attive è costituita dalla soluzione di importanti problematiche tecnologiche ad opera della comunità scientifica e delle realtà imprenditoriali, quali: sistemi ICT per la gestione delle reti e del sistema e per consentire le interazioni utente-sistema-mercato, componenti e sistemi dedicati, sistemi avanzati di accumulo di energia elettrica di piccola e media taglia, sistemi per l'autogestione e la*

flessibilizzazione della domanda di energia elettrica, software per il controllo della produzione da fonti di energia rinnovabile, sistemi di misura per le varie componenti del sistema, modellazione delle reti, ecc. Una regolamentazione di tutti gli aspetti legati alla gestione di reti locali intelligenti e al loro rapporto con la rete nazionale rappresenta inoltre un'esigenza determinante ai fini della loro diffusione. Le attività per la realizzazione di sistemi di accumulo di energia dovranno essere concentrate esclusivamente su sistemi di accumulo funzionali al sistema elettrico nazionale, per natura e caratteristiche dimensionali, economiche e tecniche. Gli studi potranno riguardare le varie tecnologie allo studio della comunità scientifica internazionale: accumulo mediante aria in pressione, sistemi di accumulo chimico (con particolare attenzione all'idrogeno) o elettrochimico, supercapacitori. La maturazione di queste tecnologie potrà contribuire ad una migliore gestione del sistema di generazione-accumulo-trasmissione-distribuzione dell'energia elettrica. In questo contesto, merita un esame di fattibilità, seguito da iniziative dimostrative, la possibilità di sfruttare bacini naturali o artificiali in zone sopraelevate, opportunamente adattati a ricevere attraverso pompaggio l'acqua disponibile (eventualmente anche marina) per rappresentare un sistema per l'accumulo di energia prodotta da fonti rinnovabili collocate nello stesso sito. E' inoltre prevista l'attivazione di ricerche riguardanti i nuovi materiali avanzati per l'accumulo elettrico".

Sulla base delle attività di ricerca fondamentale, dei risultati sperimentali, degli studi applicativi e dell'evoluzione delle tecnologie di accumulo e della rete elettrica nazionale, gli obiettivi del progetto sono stati aggiornati e resi più coerenti con le aspettative del Piano Triennale 2012-2014 redatto da MSE.

In tale ottica lo scopo prioritario del progetto "Sistemi avanzati di accumulo di energia" è quello di garantire un costante ed aggiornato filone di ricerca fondamentale sulle tecnologie dell'accumulo di energia per le reti elettriche, in considerazione delle competenze ENEA più avanzate nel settore e delle necessità e possibilità richieste dal sistema elettrico nazionale e dall'apparato produttivo ad esso collegato, che sta dedicando sempre più attenzione e risorse a queste nuove tecnologie, anche in ragione dell'imprevista crescita della quota delle fonti rinnovabili.

L'obiettivo generale pertanto è la ricerca, la realizzazione e la verifica sperimentale, di sistemi di accumulo elettrico con prevalenza per quelli di tipo elettrochimico basati sul litio, ma anche ad alta temperatura e redox a flusso. Nel corso del triennio saranno anche studiati e sviluppati ulteriori metodi di accumulo innovativi che riguarderanno l'utilizzo dell'idrogeno, analizzando l'intera filiera dalla produzione, all'accumulo fino al riutilizzo finale, ed eventualmente altri sistemi di accumulo più avanzati, quali gli SMES.

L'obiettivo sarà perseguito sempre favorendo un approccio sistemico che, partendo dalla ricerca scientifica e tecnologica arrivi fino alla sperimentazione in scala significativa di sistemi prototipali e commerciali, in grado di valutare le effettive prestazioni oggi disponibili in relazione alle reali necessità della rete elettrica italiana, considerando un notevole incremento delle fonti rinnovabili intermittenti, ed eventualmente di introduzione di una crescente flotta di veicoli a trazione elettrica.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto, su scala triennale, è strutturato su tre linee di attività principali, che mirano ad intensificare la ricerca di base su sistemi di accumulo elettrochimico, con maggiore enfasi su quelli al litio particolarmente indicati per le applicazioni stazionarie nelle reti elettriche ed, in parte, anche in quelle mobili in veicoli a trazione elettrica, che possano svolgere anche funzioni di accumulo distribuito, insieme ad altri sistemi su cui si prevede di svolgere nel triennio specifiche attività di ricerca.

Studio e sviluppo di nuovi accumulatori con prestazioni elevate e con migliorate caratteristiche di sicurezza

Lo scopo dell'attività è quello di studiare accumulatori al litio dotati di sicurezza intrinseca, tale da rendere sicuro l'accumulatore nei confronti di sovraccariche accidentali o di sovrascariche dovute ad esempio a corto-circuiti interni. Tale attività verrà portata avanti studiando nuove formulazioni di elettrolita contenente additivi in grado di agire come "shuttle" limitando la tensione di cella durante le sovraccariche o capaci di diminuire l'inflammabilità dell'elettrolita in modo da evitare che la batteria prenda fuoco durante una sovraccarica accidentale. Questi additivi potranno risultare passivi o attivi a seconda che prendano parte o meno al processo elettrochimico. Le attività saranno portate avanti valutando le caratteristiche termiche ed elettrochimiche delle varie formulazioni elettrolitiche proposte. Inoltre saranno introdotti nuovi nanomateriali a base di silicio in grado di migliorare le prestazioni e ridurre i costi delle batterie al litio. Nei tre anni di attività si prevede di arrivare alla realizzazione di prototipi di scala significativa (differenziati per potenza e per energia, in funzione dell'applicazione) e di poter anche indirizzare le scelte verso le formulazioni commerciali più adatte alla rete italiana. Sulla base di ulteriori

studi, verranno avviate alcune attività su nuovi sistemi di accumulo elettrochimico, come i sistemi redox e quelli metallo-aria.

Studio e sviluppo di nuovi sistemi di accumulo alternativi a quelli al litio-ione per le fonti rinnovabili

Questa attività si propone di studiare sistemi di accumulo elettrico alternativi a quelli basati sul sistema litio-ione: quali, ad esempio, nuove tipologie di accumulo elettrochimico (come i sistemi redox e quelli metallo-aria), l'accumulo mediante idrogeno ed altri sistemi più avanzati quali ad esempio gli SMES e altri metodi che dovessero risultare promettenti per la rete nazionale. Tali sistemi saranno analizzati in termini di efficienza energetica, di fattibilità tecnica ed economica, includendo anche la valutazione delle tecnologie di riconversione dell'energia immagazzinata in energia elettrica.

Per quanto riguarda l'utilizzo dell'idrogeno, è prevista inizialmente l'analisi delle potenzialità delle tecnologie dell'idrogeno per l'accumulo elettrico nelle reali condizioni di esercizio; in una seconda fase, sulla base dei risultati degli studi di fattibilità, eventualmente si procederà alla realizzazione e sperimentazione delle soluzioni tecnologiche che dovessero risultare di interesse.

I sistemi di accumulo basati su magneti superconduttori a temperature superiori a quelle dell'elio liquido hanno una forte potenzialità per essere utilizzati in accoppiamento con tutti i tipi di fonti energetiche rinnovabili senza aumentarne esageratamente i costi. Oggi sono disponibili cavi superconduttori realizzati in MgB_2 che hanno potenzialità molto interessanti per i sistemi SMES. Il cavo tipo MgB_2 è oggi realizzabile facilmente nelle lunghezze necessarie per realizzare delle bobine superconduttrici. L'obiettivo previsto nel triennio è la realizzazione di una bobina prototipo che utilizza un cavo tipo MgB_2 .

Studi di supporto e monitoraggio

Le attività principali di ricerca, sviluppo ed esplorative sui diversi sistemi di accumulo devono essere necessariamente integrate da attività di supporto volte a rendere sempre più compatibili ed utilizzabili i sistemi di accumulo studiati con le necessità e le potenzialità della rete elettrica nazionale. In particolare, i sistemi di accumulo elettrochimico richiedono la realizzazione di dispositivi di gestione e controllo dedicati (Battery Management System, BMS), che devono essere sviluppati per le specifiche applicazioni alle reti elettriche adattando e verificando quanto è stato finora fatto per le applicazioni veicolari, che puntavano a garantire prestazioni e sicurezza in ogni condizioni di esercizio.

Proseguiranno le attività di ricerca sugli aspetti ambientali e di sicurezza delle batterie al litio con lo studio di processi innovativi di riciclo e recupero dei materiali.

Infine, in continuità con il precedente Piano Triennale 2009-2011, si ritiene che debba essere compiuto uno sforzo particolare mediante studi sul campo di sistemi di accumulo, già disponibili commercialmente ma raramente sviluppati per le diverse applicazioni nella rete elettrica, in grado di fornire dati ed informazioni sulle reali prestazioni utili per lo sviluppo di nuovi materiali e sistemi con l'individuazione e la definizione di cicli e procedure di prova specifici.

Nel primo anno di attività sono proseguite le attività di ricerca fondamentale e di analisi delle potenzialità applicative e dei vantaggi prevedibili dei sistemi di accumulo elettrochimico a base di litio, con l'obiettivo di ottenere materiali ed assemblaggio con ridotti costi specifici (per unità di energia e di potenza) e più lunga vita operativa, e quindi sempre più rispondenti alle esigenze delle applicazioni nelle reti elettriche. Sono state avviate attività di studio su sistemi di accumulo alternativi di tipo elettrochimico (batterie redox a flusso e metallo – aria) ed è stata valutata la fattibilità tecnica ed economica di soluzioni completamente innovative (come gli SMES ed i sistemi integrati per la generazione, l'accumulo e l'utilizzo dell'idrogeno).

Il progetto si articola in sei obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di celle al litio con materiali innovativi

È proseguita l'attività di ricerca su materiali anodici e catodici in grado di migliorare le prestazioni e, soprattutto, i costi di acquisto ed operativi delle batterie al litio, senza peraltro dimenticare gli aspetti ambientali e di sicurezza nella scelta dei materiali e nelle condizioni operative di uso.

Le attività di ricerca sono state sostanzialmente divise in due filoni: uno di ricerca sui materiali, mirando a migliorare le prestazioni di materiali innovativi già studiati negli anni precedenti, oppure selezionando materiali completamente nuovi (come gli ossidi di silicio) con caratteristiche particolarmente promettenti; e l'altro di scale-

up ed integrazione dei materiali più interessanti in celle da laboratorio in scala significativa (centinaia di mAh) per verificarne e confermarne sperimentalmente le effettive potenzialità applicative. Le attività sono state condotte da ENEA e nell'ambito di collaborazioni con le Università di Bologna e Camerino. Presso le università è proseguito lo studio e l'ottimizzazione dei materiali, sia catodici che anodici, con caratterizzazioni sperimentali in celle da laboratorio secondo procedure di prova concordate e sviluppate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE, mentre l'ENEA ha svolto attività di ricerca sui materiali e sui metodi di preparazione di elettrodi e celle complete.

Per gli aspetti di sicurezza l'ENEA ha inoltre condotto un'analisi dei possibili composti chimici, detti "redox shuttle", in grado di garantire una protezione attiva delle batterie al litio indipendentemente dal sistema di gestione e controllo (BMS).

Materiali catodici

Le attività svolte dall'Università di Bologna hanno riguardato lo sviluppo di materiali catodici a base di LiMnPO_4 per la realizzazione di batterie litio-ione ad elevata energia specifica [rapporto RdS/2013/236]. La ricerca ha comportato lo sviluppo di cinque tipologie di sintesi di polveri a base di LiMnPO_4 e di $\text{LiMn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{PO}_4$, ricoperte di carbone, la loro caratterizzazione strutturale e morfologica, la preparazione di elettrodi con i materiali prodotti e la loro caratterizzazione elettrochimica in celle vs. litio ed in configurazione di batteria litio-ione con anodi sviluppati da altri partner.

Nella precedente annualità l'Università di Bologna aveva avviato uno studio sul LiMnPO_4 , individuando un metodo di sintesi sol-gel di tale materiale, ricoperto di carbone, partendo da precursori solubili. Nel corso dell'annualità oggetto del presente rapporto, la sintesi è stata ottimizzata anche con l'introduzione di una percentuale (3-6% in peso) di V_2O_3 per migliorarne le prestazioni elettrochimiche. E' stata inoltre condotta una sintesi allo stato solido di LiMnPO_4 introducendo un precursore del V_2O_3 .

Sintesi sol-gel ed a stato solido

Al fine di sviluppare un materiale catodico basato su litio manganese fosfato, stabile a ripetuti cicli di carica/scarica ed avente un'elevata capacità specifica, sono stati preparati diversi particolari a base di LiMnPO_4 e di $\text{LiMn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{PO}_4$, ricoperti di carbone. Sono state sviluppate diverse tipologie di sintesi, sia sol-gel (sintesi S-0, S-I, S-II, S-IIB e S-III) che allo stato solido (sintesi S-IV), partendo da diversi precursori, anche in presenza di V_2O_3 o di un suo precursore, al fine di valutare l'efficacia della presenza di derivati del vanadio sulle prestazioni elettrochimiche del materiale sintetizzato.

Per le sintesi sol-gel ed a stato solido, sottoelencate, sono stati analizzati diversi processi di preparazione.

- Sintesi sol-gel S-I di $\text{LiMnPO}_4, \text{V}_2\text{O}_3$ 6,5%p/p / $\text{C}_{14\%}$ p/p (V_2O_3 aggiunto prima della pirolisi)
- Sintesi sol-gel S-II di $\text{LiMnPO}_4/\text{C}_{14\%} \text{V}_2\text{O}_3$ 3% (V_2O_3 aggiunto dopo la pirolisi)
- Sintesi sol-gel S-IIB di $\text{LiMnPO}_4/\text{C}_{7\%}, \text{V}_2\text{O}_3$ 3% (V_2O_3 aggiunto dopo la pirolisi)
- Sintesi sol-gel S-III di $\text{LiMn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{PO}_4/\text{C}$
- Sintesi allo stato solido S-IV per la preparazione di $\text{LiMnPO}_4, \text{V}_2\text{O}_3$ 2,4%/C_{3,3%} (utilizzando NH_4VO_3 come precursore di V_2O_3).

La sintesi sol-gel S-0 di LiMnPO_4/C , proposta lo scorso anno, aveva prodotto LiMnPO_4/C con buone prestazioni elettrochimiche e queste sono prese come riferimento per la valutazione delle prestazioni dei materiali ottenuti con le nuove sintesi. Rispetto a quanto fatto in precedenza è stata modificata la procedura di preparazione dello slurry per la preparazione delle stese da cui venivano punzonati gli elettrodi; la nuova procedura ha permesso di ottenere stese omogenee di carico elettrodico superiore a quelle ottenute in precedenza.

Caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi preparati con i vari materiali sintetizzati

Elettrodi preparati con i materiali provenienti dalle diverse sintesi sono stati caratterizzati a diverse temperature in etilcarbonato (EC): dimetilcarbonato (DMC)-LiPF₆ 1M, in celle a 3 elettrodi, con contro elettrodo e elettrodo di riferimento di litio fra 2,5 e 4,5 V (salvo diversamente indicato), utilizzando un potenziostato/galvanostato multicanale.

La caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi a 50 °C è stata condotta mediante:

- ripetuti cicli di carica CC(C/10)-CV(C/20)/scarica CC(C/10) per valutare la capacità di carica e scarica degli elettrodi a bassa C-rate e la loro stabilità a cicli profondi;
- carica CC(C/10)/scarica CC (a varie C-rate: C/5, C/3, C/2, 1C e 2C, con 5 cicli ad ogni C-rate) per valutare la capacità di scarica degli elettrodi fino ad elevate C-rate;

- voltammetrie cicliche a varie velocità di scansione (0,05, 0,10, 0,20, 0,50 mV s⁻¹);
- stabilità a ripetuti cicli di carica scarica ad elevate C-rate (1C);
- misure di impedenza.

La caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi a diverse temperature è stata eseguita mediante cicli galvanostatici di carica e scarica a diverse C-rate (C/10, C/5 e 1C) a 30°C, a 10 °C e quindi a 50 °C in sequenza sullo stesso elettrodo, dopo 2 cicli a C/10 e 4 voltammetrie cicliche a diverse C-rate a 50°C.

Il dettaglio della sperimentazione ed i risultati ottenuti nelle diverse prove sono riportati nel rapporto RdS/2013/236.

Sono stati caratterizzati elettrodi a base di:

- LiMnPO₄/C_{14%} da sintesi sol gel S-0 (Materiale attivo: LiMnPO₄ 73%)
- LiMnPO₄·V₂O₃ 6,5% /C_{14%} da sintesi sol gel S-I (Materiale attivo: LiMnPO₄ 68%)
- LiMnPO₄/ C_{14%}·V₂O₃ 3% da Sintesi S-II (Materiale attivo: LiMnPO₄ 71%)
- LiMnPO₄/ C_{7%}·V₂O₃ 3% da Sintesi S-IIB (Materiale attivo: LiMnPO₄ 77%)
- LiMn_{0,9}Fe_{0,1}PO₄/C_{17%} da sintesi sol gel S-III (Materiale attivo: LiMn_{0,9}Fe_{0,1}PO₄ 69%).
- LiMnPO₄/C_{3,3%} da sintesi a stato solido S-IV (86,4% LiMnPO₄/C_{3,3%}, V₂O₃ 2,4% /9% C_{SP}, 4,6% pVDF) (Materiale Attivo: LiMnPO₄ 81%).

I carichi degli elettrodi analizzati sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Elettrodi caratterizzati a diverse temperature

Codice elettrodo	Composito mg	Materiale attivo mg	mg _{attivo} /cm ²
SI_a10	6,99	4,75	7,42
SII_b5	3,57	2,53	3,95
SIIB_a9	3,60	2,77	4,33
SIV_b5	2,98	2,41	3,74
SIII_a1	2,45	1,69	2,66

Analisi comparativa dei risultati ottenuti con i materiali sviluppati

Dai risultati delle cariche/scariche galvanostatiche di celle con i materiali sviluppati con le diverse sintesi e riassunti nelle Figure 1 e 2 è emerso quanto segue.

Gli elettrodi che presentano la migliore stabilità al ciclaggio sono quelli dalla sintesi S-I anche se il valore di capacità specifica a C/10 è più basso (75 mAh/g) di quello della preparazione S-0 (100 mAh/g), valore che però rimane costante su 35 cicli a differenza di quello da sintesi S-0 che dopo 50 cicli si riduce al 50%. Anche la stabilità a 1C è buona (calo del 25% dopo 100 cicli, 0,25%/ciclo), e la capacità di scarica ad alte C-rate è elevata, essendo a 1C e a 2C, rispettivamente, l'88% e l'80% di quella a C/5. Inoltre questi elettrodi hanno mostrato il minor calo di prestazioni in termini di capacità al diminuire della temperatura.

Per quanto riguarda gli elettrodi dalle sintesi S-II e S-IIB, entrambe le tipologie partono da valori di capacità specifica a C/10 di 100 mAh/g, valore che dopo 50 cicli si riduce al 75% (0,5%/ciclo) per S-II e al 70% (0,6%/ciclo) per SIIB. Le stabilità a 1C sono migliori rispetto a quelle a C/10 (calo del 22% e del 34% dopo 100 cicli, rispettivamente, per S-II e S-IIB). Le capacità di scarica ad alte C-rate a 1C e a 2C sono rispettivamente il 36% e il 18% di quella a C/5 per S-II e il 56% e il 35% di quella a C/5 per S-IIB. Pertanto il materiale dalla sintesi S-II, pur presentando prestazioni migliori rispetto a quelle del materiale di riferimento in termini di stabilità, mostra un'inferiore capacità di scarica ad alte C-rate. Il materiale da sintesi S-IIB invece, nonostante la stabilità leggermente inferiore a 1C rispetto al materiale di riferimento, mostra un notevole miglioramento, anche rispetto alla S-II, per quanto riguarda la capacità di scarica ad alte C-rate.

Per quanto riguarda gli elettrodi da sintesi S-III, la capacità specifica a C/10 è 75 mAh/g e dopo 50 cicli si riduce al 50% (0,7%/ciclo). Le capacità di scarica ad alte C-rate sono a 1C e a 2C, rispettivamente, il 50% e il 33% di quella a C/5. Anche in questo caso si è ottenuto un miglioramento di stabilità al ciclaggio rispetto al materiale da sintesi S-0, ma il valore di capacità specifica iniziale a C/10 è inferiore.

Per quanto riguarda gli elettrodi da sintesi S-IV, la capacità specifica a C/10 è più elevata, anche se di poco (105 mAh/g) di quella degli elettrodi da sintesi S-0 e dopo 50 cicli si riduce al 70% (0,6%/ciclo). Anche la stabilità a 1C è buona (calo del 27% dopo 100 cicli, 0,27%/ciclo) e la capacità di scarica ad alte C-rate è elevata, essendo a 1C e a 2C rispettivamente 75% e 67% di quella a C/5.

Infine per una più completa interpretazione dei risultati elettrochimici ottenuti con i materiali sviluppati con le diverse sintesi sono state inoltre confrontate le caratteristiche morfologiche e strutturali dei materiali (attraverso analisi SEM, Raman, XRD). I materiali risultano molto simili strutturalmente ma con un comportamento migliorato dall'aggiunta del vanadio.

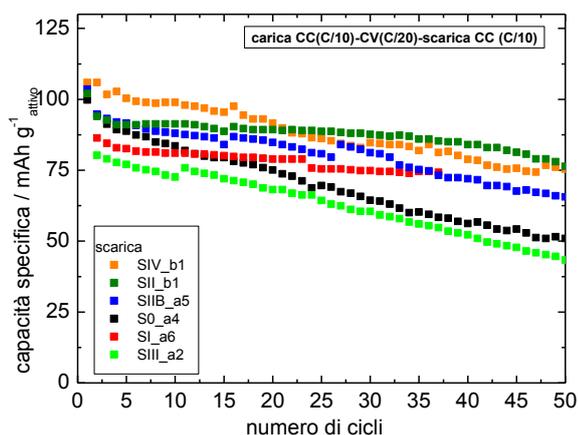


Figura 1. Confronto a 50°C della capacità specifica di scarica e vs. numero di cicli CC(C/10)-CV(C/20)/CC(C/10) fra 2,5 e 4,5 V di elettrodi di diversa tipologia

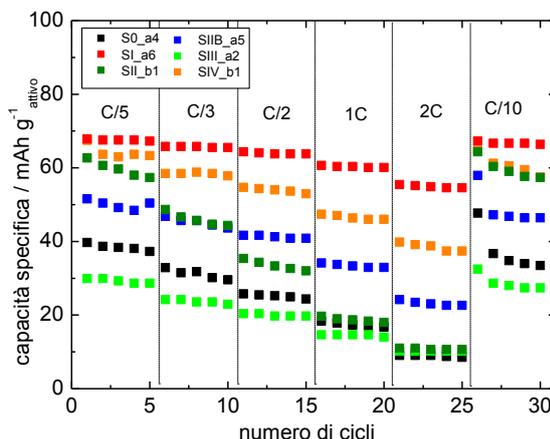


Figura 2. Confronto a 50°C della capacità specifica di scarica alle alte C-rate durante cicli CC(C/10)/CC(C/10) fra 2,5 e 4,5 V degli elettrodi in studio

Caratterizzazione elettrochimica in EC: DMC- LiPF₆ 1 M di batterie litio-ione con catodi a base di LiMnPO₄ da sintesi S-I e anodi di UNICAM

L'Università di Bologna ha utilizzato il materiale catodico più promettente, quello prodotto con la sintesi S-I, per la realizzazione di celle litio-ione (oltre una decina) da caratterizzare in laboratorio. In particolare, sono state realizzate diverse celle prototipali con anodi convenzionali e con anodi a base di grafene e di silicio prodotti dall'Università di Camerino (UNICAM).

I vari elettrodi sono stati pesati e il carico di materiale attivo è stato valutato in base alla composizione indicata da UNICAM (Tabella 2).

Tabella 2. Elettrodi a base di grafene-Sn-Sb (GSNSB)

Codice Elettrodo	Massa composito mg	Massa attivo mg	Carico attivo mg/cm ²
GSNSB_1	0,8	0,64	1,22
GSNSB_2	0,61	0,49	0,96
GSNSB_3	0,79	0,63	1,20
GSNSB_4	0,64	0,51	0,97
GSNSB_5	0,61	0,49	0,96

L'Università di Camerino ha trasmesso un elettrodo a base di GSNSB con carico di materiale attivo di 1,82 mg cm⁻² ciclato in cella vs. litio a varie C-rate (C/15, C/7,5, C/3,7, C/1,5, 5 cicli iniziali a C/15 seguiti da 10 cicli per ogni C-rate intervallati da 2 cicli a C/15). Tali anodi sono stati preciclati per 6 cicli a C/10 in modo da minimizzare il calo di capacità, mentre i catodi dell'Università di Bologna a base di LiMnPO₄/V₂O₃/C da sintesi S-I sono stati preciclati per 2 cicli a C/10 prima di assemblarli in batteria.

E' stata assemblata la cella con riferimento di litio. Sono stati fissati come valori di cut-off di potenziale di carica e scarica del catodo, 4,5 V e 2,5 V e dell'anodo, 0,010 V e 2,0 V rispetto all'elettrodo di Li. La Figura 3 mostra i profili di potenziale e i valori di capacità della batteria (riferiti al peso del materiale attivo totale) durante i primi cicli di carica-scarica a C/10 con correnti valutate sulla capacità teorica del catodo.

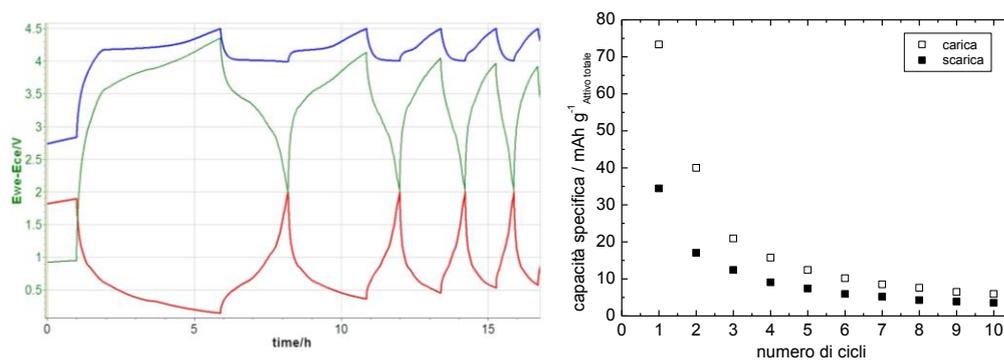


Figura 3 . Profili di potenziale del catodo (blu), dell'anodo (rosso) e della batteria (verde) in EC:DMC LiPF₆ 1 M e i valori di capacità specifica della batteria riferiti al peso materiale attivo totale durante i cicli di carica-scarica a C/10 (corrente valutata sulla capacità teorica del catodo)

Come si può notare la cella, che mostra un'elevata capacità irreversibile nei primi due cicli, presenta una forte perdita di capacità con il ciclaggio: durante la carica, il catodo si carica completamente ma l'anodo non riesce ad scendere sotto 0,1 V vs. Li, mentre durante la scarica, il catodo non riesce a scaricarsi (non scende sotto 4,0 V vs. Li) in quanto l'anodo raggiunge il potenziale di cut-off di 2,0 V e questo è dovuto allo sbilanciamento della capacità ciclabile dai due elettrodi. E' stato infatti verificato che il calo di capacità della batteria non è dovuto ad una degradazione dei due elettrodi in quanto scaricandoli singolarmente la batteria recupera la sua capacità iniziale.

Oltre ad assemblare e provare altre celle con anodi a base di silicio forniti dall'Università di Camerino, l'Università di Bologna ha assemblato una batteria utilizzando come anodo di riferimento una grafite SLA-1025 (Superior Graphite) già studiata in laboratorio. In particolare è stata assemblata una cella utilizzando elettrodi di grafite (K14) e di LiMnPO₄ della stessa area (0,64 cm²) e con la stessa capacità pratica a C/10. La batteria è stata ciclata in EC-DMC- LiPF₆ 1 M a 50°C a C/5 e 1C e sono stati fissati come valori di cut-off di potenziale di carica e scarica per il catodo 4,5 V e 2,5 V e per l'anodo 0,010 V e 1,5 V vs. Li, poi portati a 0,010 e 2,0 V vs. Li, ed i risultati sono mostrati in Figura 4.

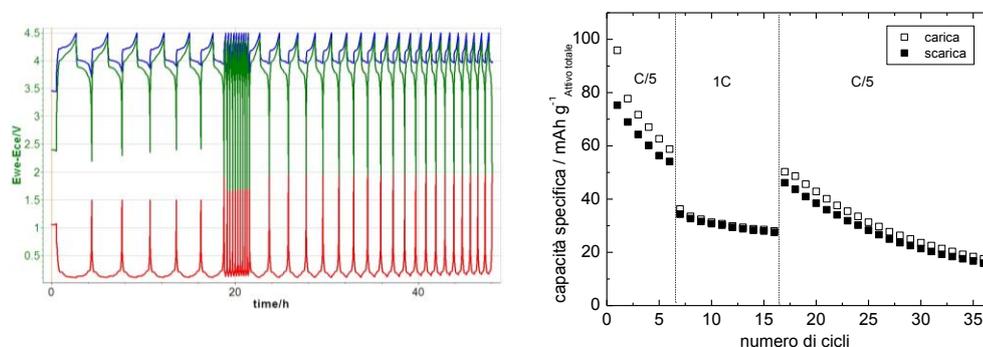


Figura 4. Profili di potenziale del catodo (blu), dell'anodo (rosso) e della batteria K14//SI-a20 (verde) in EC:DMC LiPF₆ 1 M e i valori di capacità specifica della batteria riferiti al peso del materiale attivo totale durante i cicli di carica-scarica a C/5 e 1C

Come si può notare la stabilità al ciclaggio è significativamente migliore rispetto a quella delle due precedenti celle e questo è dovuto sia ad una minore capacità irreversibile al 1° ciclo che a un migliore bilanciamento della capacità ciclabile dai due elettrodi della stessa area, particolarmente alla più alta C-rate. Ovviamente anche per questa cella il bilanciamento del carico dei due elettrodi dovrebbe essere ottimizzato per un miglioramento della sua stabilità; d'altra parte l'ottimizzazione del bilanciamento del carico è uno dei compiti più gravosi per lo sviluppo di una batteria.

Conclusioni

La strategia di introdurre V₂O₃ o un suo precursore, rispettivamente nelle sintesi sol-gel o allo stato solido, ha prodotto materiali catodici con prestazioni generalmente superiori a quelle del materiale di riferimento LiMnPO₄/C. Le buone proprietà elettrochimiche in celle, rispetto al litio, degli elettrodi preparati con il materiale

da sintesi sol-gel S-I, LiMnPO_4 , V_2O_3 $_{6,5\%p/p}$ / $\text{C}_{1,4\%p/p}$, di stabilità a ripetuti cicli di carica/scarica e di risposta ad alte C-rate, sono correlabili alla piccola dimensione dei cristalliti di LiMnPO_4 per il trasporto del litio e alla maggior componente grafite del carbone di ricoprimento, presumibilmente dovute alla presenza del V_2O_3 introdotto in fase di sintesi prima della pirolisi. Resta da chiarire per tale materiale la ragione della bassa capacità specifica a basse C-rate: tentativamente, questo effetto potrebbe essere attribuito ad una non ottimale omogeneità nella dimensione del particolato. Si può inoltre aggiungere che va perseguita l'ottimizzazione della sintesi allo stato solido S-IV, mentre va abbandonata la sintesi di $\text{LiMn}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}\text{PO}_4$ per i deludenti risultati.

Per quanto riguarda lo studio delle celle litio-ione con catodo basato sul materiale ottenuto da sintesi S-I, selezionato per le sue migliori proprietà elettrochimiche, in abbinamento con gli anodi preparati dall'Università di Camerino, non ha dato risultati soddisfacenti in termini di stabilità al ciclaggio, e questo non per una degradazione degli elettrodi ma per uno sbilanciamento della capacità ciclabile dai due elettrodi, risultato peraltro non sorprendente in quanto il bilanciamento delle masse elettrodiche è uno dei problemi più delicati nello sviluppo di batterie litio-ione con nuovi materiali anodici e catodici.

Materiali anodici

L'Università di Camerino ha svolto attività di ricerca sui materiali mirata all'ottimizzazione della preparazione di anodi composti ad elevata capacità a base di leghe reversibili con litio [rapporto RdS/2013/237]. Nell'annualità precedente erano stati sviluppati elettrodi composti a base di stagno, silicio, antimonio e grafene (o più propriamente ossido di grafene ridotto RGO, preparato per riduzione dell'ossido di grafene, ottenuto a sua volta dall'ossidazione chimica della grafite). In essi i metalli Sn, Si, Sb sono il materiale attivo che forma reversibilmente leghe con il litio, mentre il grafene è utilizzato come matrice in grado di compensare le grandi variazioni di volume che hanno luogo durante la formazione-dissoluzione delle leghe Li-Sn, Li-Si, Li-Sb. Il principale problema da risolvere degli elettrodi a lega di litio è lo stress meccanico dovuto a variazioni di volume durante l'inserzione o deinsersione del litio nel materiale attivo, che provoca la polverizzazione dell'elettrodo e la progressiva diminuzione di capacità specifica. Un altro problema fondamentale che caratterizza questa tipologia di anodi è la grande capacità irreversibile al primo ciclo, dovuta sia alla formazione dello strato di passivazione all'interfaccia elettrodo/soluzione (Solid Electrolyte Interphase, SEI), sia alla riduzione degli ossidi dei metalli.

Nella presente annualità UNICAM ha puntato alla preparazione degli elettrodi ottimizzati, agendo su vari livelli di preparazione, tra cui ottimizzazione della sintesi del materiale attivo, utilizzo di binder alternativi e introduzione di additivi nell'elettrolita.

Le attività si sono concentrate su tre tipologie di anodi a base di grafene:

1. composti RGO/Sn
2. composito RGO/Sn/Sb
3. composti contenenti Si e materiali carboniosi.

Per quanto riguarda la sintesi di *compositi RGO/Sn* si è tentato di diminuire la capacità irreversibile al primo ciclo riducendo la presenza degli ossidi di Sn ed eseguendo quindi una pre-litiazione dell'elettrodo. Per la riduzione degli ossidi si sono quindi seguite due vie:

- la riduzione degli ossidi per via termica, aumentando la durata dell'annealing in atmosfera riducente del composito sintetizzato;
- l'utilizzo di RGO (in sostituzione di ossido di grafene GO) nella sintesi e la riduzione in situ dello ione Sn^{2+} con NaH_2PO_2 , in modo da ovviare allo sviluppo di ossigeno durante la riduzione di GO a RGO che avviene tramite microonde.

Oltre alla riduzione degli ossidi, l'altra via per la riduzione della capacità irreversibile al primo ciclo è la pre-litiazione dell'elettrodo utilizzando polvere di litio metallico stabilizzato (Lectro Max[®], FMC Lithium, USA). In una batteria reale l'utilizzo di questa polvere previene il consumo del litio al catodo durante la formazione del SEI, poiché agisce come fonte alternativa di litio.

Per la sintesi del *composito RGO/Sn/Sb* è stato applicato il concetto, per primo proposto da Huggins¹, di matrice conduttiva mista. Lo scopo è di ottenere un materiale elettrodico multifase caratterizzato da una struttura microporosa che compensi le variazioni di volume delle leghe Li-metallo, in modo da ottenere una maggiore stabilità dell'elettrodo. La matrice conduttiva mista consiste nella dispersione della fase reattiva (cioè il metallo che lega il litio) all'interno di una matrice metallica conduttiva solida. Nel composito RGO/Sn/Sb le due fasi Sn e SnSb sono caratterizzate da diversi potenziali per la formazione-dissoluzione di leghe con il litio.

1 R. A. Huggins, "Lithium alloy negative electrodes", Journal of Power Sources, 81-82 (1999), 13-19.

Sono state inoltre valutate le prestazioni elettrochimiche di *anodi compositi contenenti silicio e materiali carboniosi*. Diverse metodologie di sintesi del materiale attivo e diverse formulazioni degli elettrodi sono state valutate, al fine di ottimizzare le prestazioni elettrochimiche per quanto riguarda: i) aumento della capacità reversibile; ii) diminuzione della capacità irreversibile al primo ciclo; iii) miglioramento della reversibilità e della vita ciclica. Per la preparazione degli elettrodi è stato utilizzato silicio nanometrico commerciale (la sintesi da precursori organici di silicio non ha fornito buoni risultati a causa della difficoltà nella riduzione del Si^{4+}). Come materiali carboniosi sono stati utilizzati RGO, preparato da ossido di grafene commerciale o sintetizzato in laboratorio, o grafite commerciale.

Per quanto riguarda il binder, si è cercato di migliorare le prestazioni del polivinilidene fluoruro (PVDF) che soffre per una mancanza di elasticità, e non è quindi in grado di contenere l'enorme espansione volumetrica del silicio durante i processi di litiazione/delitiazione. Per questo scopo sono stati testati sodio-carbossimetilcellulosa (Na-CMC) e acido poliacrilico (PAA). La scelta di *binder* alternativi al tradizionale PVDF permette inoltre di modificare il solvente in cui sono preparati gli *slurries*, passando da N-metil-2-pirrolidone (NM2P), costoso e tossico, a solventi più ecocompatibili ed economici come acqua o alcoli.

È stato inoltre valutato e implementato l'utilizzo di vinilene carbonato come additivo all'interno dell'elettrolita, al fine di migliorare la chimica di superficie del grafene che ha un'influenza fondamentale nelle prestazioni finali dell'elettrodo.

Infine, nel tentativo di ridurre la capacità irreversibile associata all'elevata superficie attiva della matrice carboniosa, sono state eseguite delle caratterizzazioni su compositi in cui si è utilizzata grafite cristallina come matrice carboniosa in sostituzione di RGO.

La caratterizzazione strutturale e morfologica dei materiali attivi e degli elettrodi è stata fatta mediante analisi termogravimetrica, spettroscopia infrarossa (FTIR), microscopia elettronica a scansione (SEM), diffrazione di raggi (XRD). La caratterizzazione elettrochimica delle celle ottenute è stata eseguita mediante cicli galvanostatici a diverse velocità di carica/scarica, e spettroscopia elettrochimica d'impedenza utilizzando un galvanostato/potenzio stato multicanale.

Una descrizione delle sintesi e dei risultati delle caratterizzazioni effettuate è riportata in dettaglio nel rapporto RdS/2012/237.

La sintesi dei nanocompositi RGO/M e la preparazione degli elettrodi hanno messo in luce diversi aspetti :

- L'utilizzo di RGO e riduzione *in situ* dello ione Sn^{2+} costituisce un'alternativa valida per la preparazione del composito RGO/Sn. Le prestazioni elettrochimiche degli elettrodi costituiti da RGO/Sn²⁺ sono molto promettenti: la capacità al 40° ciclo è pari a 550 mAh/g a 50 mAh/g e di 522 mAh/g a 500 mAh/g. Dopo 120 cicli veloci, la capacità specifica raggiunge il valore di 376 mAh/g, valore coincidente alla capacità teorica della grafite.
- Gli elettrodi di RGO/Sn/Sb dimostrano l'efficacia dell'applicazione della matrice conduttiva mista in termini di capacità specifica (569 mAh/g al 40° ciclo a 50 mAh/g). Tuttavia, all'aumentare del numero dei cicli, gli elettrodi si rompono, come dimostrato da misure d'impedenza, suggerendo quindi una necessità di ottimizzare la loro preparazione.
- La diminuzione progressiva della percentuale di Si contenuta nei nanocompositi RGO/Si si è rivelata una strategia efficace verso il miglioramento delle prestazioni: un contenuto troppo alto di silicio non opportunamente supportato si è dimostrato deleterio per le prestazioni, in particolare per la vita ciclica e per la ritenzione di capacità a lungo termine. Il tenore finale di Si nei compositi dipende in buona parte dalla riduzione termica che è lo stadio finale della sintesi: controllare adeguatamente il flusso di Ar:H_2 è di fondamentale importanza, al fine di evitare una riduzione eccessiva dell'ossido di grafene a prodotti volatili che si allontanano dal composito e fanno aumentare la percentuale in peso di Si.
- Un altro punto importante da tenere in considerazione è la dispersione delle particelle di Si: poiché queste tendono alla riaggregazione, è necessario continuare a lavorare sull'utilizzo di eventuali reticolanti che fanno da *template*, come il PAA adottato, e più in generale su metodologie di dispersione più efficienti come gli ultrasuoni.
- La qualità dell'ossido di grafene utilizzato è anch'essa importante: il metodo Hummer modificato usato in laboratorio non garantisce un'esfoliazione ottimale e il GO prodotto tende a un facile "stacking" durante la riduzione termica, producendo così aggregati di 17-20 strati di grafene sovrapposti che peggiorano il supporto delle nanoparticelle di Si.
- Per quanto riguarda la relazione tra la formulazione dell'elettrodo e le prestazioni elettrochimiche, il PVDF si è dimostrato inefficace nel contenere le variazioni di volume delle nanoparticelle di Si a causa delle scarse

interazioni con esse, risultando in prestazioni soddisfacenti solo per pochi cicli, decadendo poi rapidamente a valori inferiori di quelli della grafite. Anche nella preparazione degli elettrodi RGO/Sn e RGO/SnSb è auspicabile in futuro uno studio sull'utilizzo di binder alternativi al PVDF, in grado di stabilizzare l'elettrodo o accomodare l'espansione di volume delle leghe e ottenere quindi prestazioni migliori.

- L'uso del binder sodio-carbossimetilcellulosa non ha portato a prestazioni di rilievo, probabilmente dovute alla rigidità della struttura della CMC in assenza di SBR.
- L'acido poliacrilico ad alto peso molecolare (è medio 100000) stabilizza efficacemente gli elettrodi permettendo di ottenere capacità reversibili dell'ordine di 1000 mAh/g in tutti i casi in cui è stato impiegato.
- Infine, l'uso di vilidene carbonato come additivo all'elettrolita si è rivelato efficace nello stabilizzare lo strato di passivazione degli anodi e nel migliorare quindi le prestazioni dal punto di vista della vita ciclica e della ritenzione di capacità a lungo termine.

Preparazione e caratterizzazione morfologica di anodi di silicio nanostrutturati per batterie litio-ione

Al fine di selezionare materiali anodici con prestazioni migliorate e costi sempre più ridotti, l'ENEA ha avviato la messa a punto di un processo innovativo per la preparazione di materiali anodici a base di silicio. L'interesse per il silicio come materiale attivo anodico per batterie litio-ione risiede nella sua elevata capacità teorica (4200 mAh/g contro 372 mAh/g della grafite usata nelle batterie commerciali) che risulta persino maggiore di quella del Li metallico (3800 mAh/g). La sostituzione della grafite con silicio come materiale anodico permetterebbe quindi un aumento di un fattore 10 della capacità anodica e, pertanto, un analogo decremento in peso e volume dell'anodo, con conseguente incremento della densità di energia. Sinora l'utilizzo di silicio come materiale anodico è stato impossibilitato a causa della rapida perdita di capacità durante i cicli di carica/scarica, essenzialmente dovuta al considerevole aumento di volume (300%, conseguente all'intercalazione degli ioni litio) che comporta una progressiva disgregazione della struttura del silicio causando la polverizzazione del materiale e la conseguente perdita di contatto tra il silicio ed il collettore di corrente.

Studi recenti hanno indicato che l'uso di nanostrutture a base di silicio potrebbe risolvere questo inconveniente. In questo ambito, i nanofili di silicio si sono mostrati molto promettenti in quanto queste strutture sono in grado di disporre di spazio vuoto per sopportare le variazioni di volume e permettono un più facile rilassamento delle sollecitazioni indotte dall'inserzione dello ione litio. Malgrado le caratteristiche favorevoli, questo tipo di nanostrutture attualmente soffre ancora di una diminuzione della capacità dopo cicli ripetuti di carica e scarica.

Nessuna tra le varie tecniche di fabbricazione alternative, le più importanti sono MBE (Molecular Beam Epitaxy) e PLD (Pulsed Laser Deposition), ha la possibilità di competere con la versatilità, l'affidabilità e la controllabilità dei processi dati dalla CVD (Chemical Vapour Deposition). In questo studio, il metodo di sintesi utilizzato per la produzione di nanofili è CVD con catalizzatore metallico. In questa fase iniziale è stato utilizzato oro come catalizzatore per funzionalizzare la superficie del substrato alla crescita dei nanofili. Sebbene esistano metalli alternativi per la crescita di nanofili di silicio, ad esempio Al, Fe, Cu e Ni per citarne solo alcuni, l'oro risulta più adatto per la bassa temperatura dell'eutettico, la bassa tensione di vapore e la compatibilità con il sistema da vuoto.

Nel corso dell'annualità 2012-13 sono stati effettuati test di crescita di nanofili di silicio su substrati di rame ed acciaio. Il substrato di acciaio è risultato il materiale più conveniente per gli iniziali studi di crescita. Sono state studiate le condizioni di crescita dei nanofili su acciaio al fine di ottenere ricoprimenti ad alta densità. Sono state gettate inoltre le basi per sviluppare una metodologia in grado di determinare il peso del film nanostrutturato depositato. I campioni realizzati sono stati utilizzati per la realizzazione di anodi che sono stati caratterizzati in celle da laboratorio [RdS/2013/238].

Crescita e morfologia dei nanofili di Si

I nanofili sono cresciuti mediante deposizione chimica da fase vapore. Il gas precursore usato è il disilano che viene immesso nella camera di crescita tramite un sistema di controllo di flusso. Il substrato è mantenuto in temperatura e nell'interazione con il precursore si provoca una dissociazione della molecola per pirolisi. Nel caso del disilano, i prodotti di dissociazione contenenti atomi di silicio tendono a depositarsi sul substrato dando avvio alla crescita di un film. Al fine di ottenere nanostrutture filari, cioè limitate nelle dimensioni del piano nell'ordine dei nanometri ed estese nella terza dimensione anche per decine di μm , è necessaria in genere la mediazione catalitica di un metallo che viene depositato sulla superficie del substrato prima dell'esposizione al precursore. Nel corso di questi studi è stato utilizzato come catalizzatore oro, depositato sul substrato per mezzo di CVD. A questo scopo è stata utilizzata una cella di Knudsen montata nello stesso sistema di crescita CVD. È noto che con l'uso di

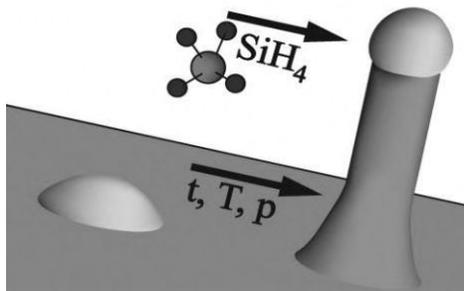


Figura 5. Meccanismo di crescita VLS

oro la crescita dei nanofili di silicio avviene secondo un meccanismo denominato Vapor-Liquid-Solid (VLS). In presenza di silicio, l'oro forma una lega eutettica che per una temperatura superiore a 370°C è liquida.

Poiché il silicio proveniente da fase gassosa tende a diffondere preferenzialmente nel liquido e nuclea all'interfaccia solido-liquido, ne risulta una crescita unidirezionale che porta alla formazione dei "fili" (Figura 5). La dimensione nanometrica dei nanofili sul piano si ottiene disponendo la formazione di "isole" di metallo sul substrato. Con adeguati parametri di deposizione, è possibile distribuire l'oro sul substrato in forma di isole nanometriche. Da queste isole parte poi la

crescita unidirezionale dei fili che sono limitati nel piano dalle dimensioni dell'isola di partenza (Figura 6).

Per la crescita CVD di *nanofili di silicio su rame* sono state usate lamine di Cu HCP (oxygen-free copper deoxidized with phosphorus, Schlenk) di 30 µm di spessore. Il metodo di deposizione è lo stesso usato per l'acciaio, che viene descritto in dettaglio nel paragrafo successivo. La Figura 7 mostra una foto SEM di nanofili ottenuti su substrato di rame. Sebbene la morfologia di superficie sia interessante e promettente, è risultato che la crescita su rame mediante CVD tende ad infragilire il substrato. Questo è probabilmente dovuto all'assorbimento di H da parte del Cu alle temperature e pressioni di crescita. Ulteriori tentativi di operare a una pressione di lavoro più bassa e a temperatura minore hanno portato ad un fenomeno di infragilimento meno accentuato ma sempre persistente. Per questo motivo si è deciso di sospendere la crescita via CVD pirolitica su questo substrato in quanto il metodo risulta inadatto. Il sistema nanoSi/Cu richiede di esplorare in futuro altre metodologie di deposizione.

La crescita di *nanofili di silicio su acciaio* è stata effettuata su lamine di acciaio 304 di 30 µm di spessore. Prima dell'inserimento nel sistema di deposizione sono state pulite in ultrasuoni con alcool isopropilico per 10'. I campioni, tagliati in quadrati di circa 9x10 mm² sono stati montati su un supporto riscaldabile di nitrato di boro pirolitico e inseriti nella camera di deposizione con un vuoto base di 1 x 10⁻⁶ Pa. I campioni di acciaio sono stati sottoposti a degassaggio fino a circa 650 °C prima di essere funzionalizzati per la crescita dei nanofili di Si. La funzionalizzazione della superficie mediante catalizzatore avviene per evaporazione fisica da una cella di Knudsen di oro posta nella stessa camera dove avviene la crescita CVD. Il ricoprimento totale di oro stimato tramite misure XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) è dell'ordine del nanometro. La successiva crescita di nanofili mediante CVD è stata effettuata utilizzando gas disilano come precursore a pressioni tra 20 e 40 Pa e variando la temperatura del substrato tra 500 e 700 °C. La densità, il diametro e lo spessore dei nanofili sono governati dall'azione contemporanea di almeno 5 parametri: temperatura del substrato, pressione del gas precursore nella camera, tempo di crescita e quantità e tipo di distribuzione (morfologia) del catalizzatore metallico sulla superficie.

Esplorare completamente lo spazio delle fasi richiederebbe la produzione di una quantità di campioni e relative caratterizzazioni proibitivi. In questa fase iniziale del progetto, è stata seguita una strategia di deposizione determinata a ottenere la maggiore probabilità di riuscita per la produzione di campioni potenzialmente adeguati all'applicazione come anodi per batterie al litio in un tempo ragionevole. Di conseguenza, si è cercato di ottimizzare i parametri di deposizione per ottenere campioni con alta densità superficiale di silicio. Assumendo costanti la quantità e morfologia dell'oro, è stata dapprima determinata una pressione di crescita sufficiente a questo scopo e quindi si è cercato di variare morfologia e densità dei nanofili variando la temperatura di deposizione.

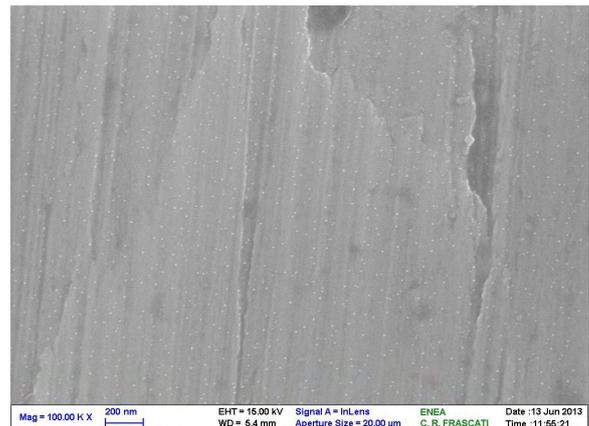


Figura 6. Foto SEM ad altissimo ingrandimento (100K X). Le isole di oro sono state depositate su un substrato di acciaio

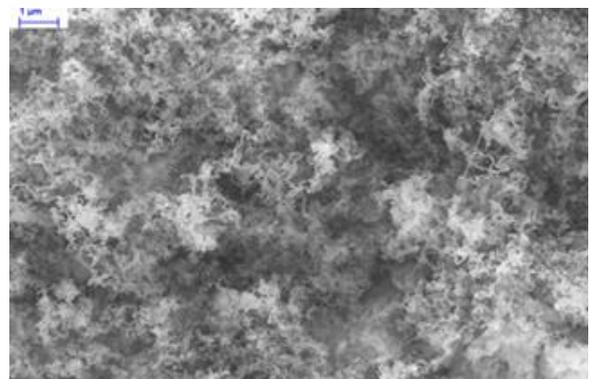


Figura 7. Nanostrutture filari di silicio cresciute su rame mediante CVD a 529 °C

Le foto SEM di Figura 8 mostrano nanofili/acciaio con lunghezze medie dell'ordine di una decina di μm cresciuti rispettivamente alla temperatura di 618 e 668 °C e a pressione di 40 Pa. L'incremento di temperatura causa un aumento del diametro medio dei fili.

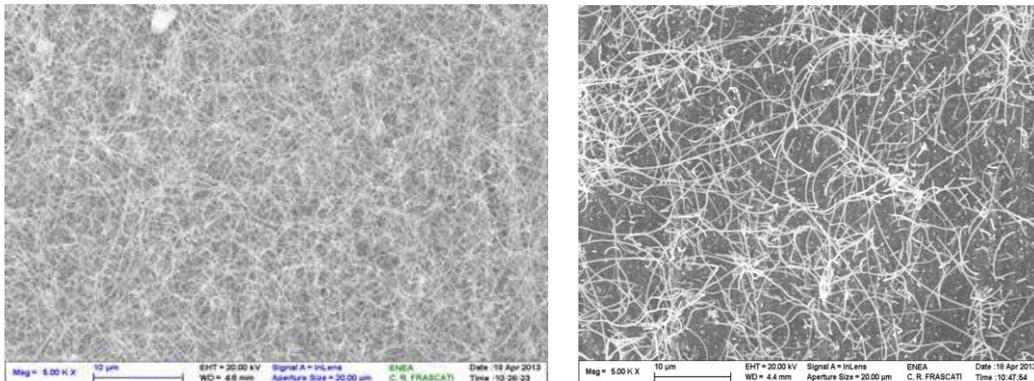


Figura 8. Foto SEM di SiNW/acciaio sintetizzati via CVD a T= 618°C e 668°C

Esperimenti successivi hanno mostrato che la morfologia ottenuta a diverse temperature non sempre risulta riproducibile. Un esempio è presentato in Figura 9, che mostra una foto SEM di un campione cresciuto a 616°C nelle stesse condizioni del campione mostrato nella figura precedente, con una maggiore densità di fili e un simile diametro medio. La causa della differenza riscontrata nella morfologia può essere dovuta ad una diversa quantità e distribuzione dell'oro sulla superficie.

La determinazione del peso o della densità superficiale media dello strato di nanofili depositato è cruciale per poter ricavare la capacità specifica (mAh/g) delle nanostrutture utilizzate come anodo per batterie al litio. Partendo da semplici assunzioni teoriche fondate sull'esame delle foto SEM della morfologia superficiale si può senz'altro assumere che la densità dei fili sia almeno dell'ordine di 1 filo/ μm^2 . La Figura 10 mostra un esempio di ricoprimento ad alta densità che permette di fare una stima qualitativa della densità dei nanofili.

Assumendo un diametro medio di 100 nm e una lunghezza media di 15 μm , si ottiene una densità superficiale di 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Da queste semplici considerazioni risulta che per buoni campioni ci si dovrebbe aspettare densità superficiali dell'ordine di alcune centinaia di $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Questo numero è concorde con dati riportati in letteratura che indicano densità di 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Analisi delle foto SEM mediante programmi di analisi dell'immagine hanno confermato l'ordine di grandezza riportato sopra per la densità, ma si sono rivelati impossibili da utilizzare per ottenere stime più accurate in quanto le nanostrutture prodotte non sono confinate in due dimensioni ma si estendono anche in modo consistente in 3D, formando strati diversi e localmente sovrapposti di cui è impossibile tenere conto con sistemi di analisi a due dimensioni.

In conclusione, i risultati ottenuti riguardo la crescita di nanofili di silicio (SiNW) confermano che la crescita di SiNW su rame è possibile ma limitata dalla tecnica di sintesi che tende ad infragilire il substrato. Invece la crescita SiNW di alta densità superficiale è più agevole su semplici e poco costosi supporti di acciaio 304 a temperature dell'ordine dei 600 °C e pressioni di 40 Pa. L'analisi morfologica effettuata mediante microscopia elettronica a scansione ha mostrato che è possibile, ad una pressione predeterminata, ottenere nanofili di diametro e densità variabile in funzione della temperatura e della morfologia del ricoprimento di oro usato come catalizzatore. Il peso degli strati di SiNW depositati, misurato con una bilancia analitica, è risultato dell'ordine dei 300-500 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$.

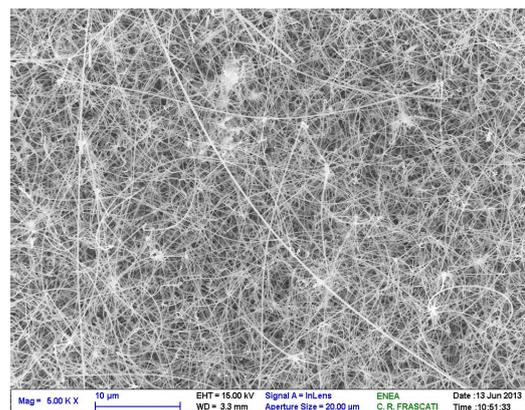


Figura 9. Foto SEM di SiNW cresciuti su substrato di acciaio a T= 616°C

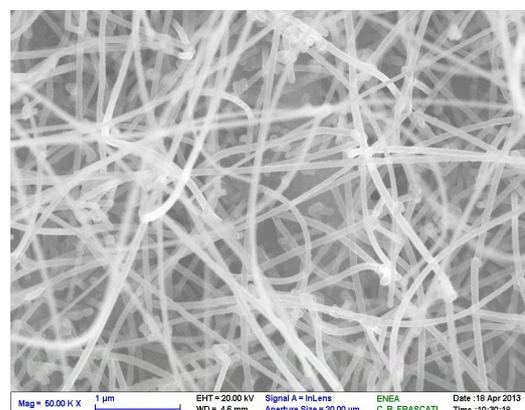


Figura 10. Foto SEM ad alto ingrandimento di SiNW/acciaio ottenuti mediante CVD a 618°C

Anodi di silicio nanostrutturati

La attività è rivolta a dimostrare la utilizzabilità dei materiali nanostrutturati a base di silicio in celle al litio. Il lavoro è stato portato avanti integrando il lavoro sperimentale con una ricerca bibliografica per valutare i principali materiali a base di silicio utilizzati come anodi in batterie al litio.

La tecnologia esistente delle batterie al litio è basata sulla combinazione di un anodo generalmente a base carboniosa e un catodo contenente litio rappresentato da un ossido o da un fosfato di un metallo di transizione (LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4). La capacità degli elettrodi (370 mAh/g per la grafite e 140-170 mAh/g per i catodi) rappresenta il limite superiore per la quantità di energia che può essere accumulata nella cella. Un materiale anodico ideale dovrebbe possedere un'alta capacità gravimetrica e volumetrica, un potenziale vicino a quello del litio metallico, una lunga vita al ciclo, elevata compatibilità ambientale, bassa tossicità e costo contenuto.

Sulla base della pura capacità specifica, il litio metallico è evidentemente il miglior materiale anodico poiché non introduce alcun peso non attivo. Tuttavia, l'elettrodeposizione di litio dendritico durante la carica può causare cortocircuiti interni, ponendo seri problemi in termini di sicurezza.

La Tabella 3 confronta le proprietà di diversi materiali anodici. Dalla tabella emerge che, tra tutti i materiali, il silicio ha la più alta capacità gravimetrica (4200 mAh/g, litiato come $\text{Li}_{4,4}\text{Si}$) e volumetrica (9786 mAh cm^{-3} calcolata sul volume iniziale di Si); in più, ha una tensione di scarica relativamente bassa (la tensione media di de-litiazione è di 0,4 V). Il silicio è anche il secondo elemento per abbondanza sulla crosta terrestre, e non risulta essere tossico od inquinante, inoltre l'industria dei semiconduttori ha sviluppato infrastrutture mature per la lavorazione del silicio. Appare chiaro pertanto che il silicio rappresenti la scelta più attraente nell'individuazione di un nuovo materiale anodico. La capacità specifica teorica del silicio è di un ordine di grandezza più alta di quella degli anodi di grafite convenzionali, ma la notevole variazione di volume (>300%) nella litiazione e de-litiazione si traduce in scarsa ciclabilità.

Tabella 3. Proprietà di diversi materiali utilizzabili come anodi in batterie al litio.

Materiale	Li	C	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	Si	Sn	Sb	Al	Mg
Densità (g/cm^3)	0,53	2,25	3,5	2,3	7,3	6,7	2,7	1,3
Fase litiata	Li	LiC_6	$\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	$\text{Li}_{4,4}\text{Si}$	$\text{Li}_{4,4}\text{Sn}$	Li_3Sb	LiAl	Li_3Mg
Capacità specifica teorica (mAh/g)	3862	372	175	4200	994	660	993	3350
Variazione volume (%)	100	12	1	420	260	200	96	100
Potenziale verso Li (V)	0	0,05	1,6	0,4	0,6	0,9	0,3	0,1

Caratterizzazione sperimentale di nanofili di silicio in film sottile

È stata esplorata la possibilità di deporre film di silicio nano cristallino tramite tecnica di deposizione chimica in fase vapore a bassa pressione. Tale tecnica denominata LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) è un processo utilizzato nella deposizione di film sottili su substrati semiconduttori con spessori che normalmente vanno da pochi nanometri a molti micrometri. La tecnica LPCVD viene usata per depositare un'ampia gamma di film con differenti composizioni ed è caratterizzata da una buona uniformità di copertura. È stato sviluppato un processo atto a densificare il materiale per assicurare una maggiore capacità: attualmente la superficie dell'acciaio viene ricoperta con uno strato di oro, ma in prospettiva questo passaggio sarà del tutto eliminato.

Uno dei maggiori problemi inerenti la tecnica di deposizione LPCVD è che non si riesce a valutare la quantità di silicio depositato, e quindi la capacità specifica del materiale ottenuto. Al momento è possibile stimare che i campioni depositati su acciaio possano avere un peso di 100 μg ed uno spessore di circa 500 nm, mentre i depositi più densi possono arrivare a pesare 200 μg . Un altro problema riguarda la quantità di materiale che può essere prodotta. Infatti allo stato attuale, visto lo stadio molto preliminare delle attività e le possibilità offerte dall'attrezzatura disponibile, è impensabile poter ottenere grosse quantità di materiale da utilizzare in accumulatori dimostrativi o di taglia significativa. Le attività nel laboratorio hanno portato alla realizzazione di tre campioni sui quali sono state effettuate le prove elettrochimiche (Figura 11).

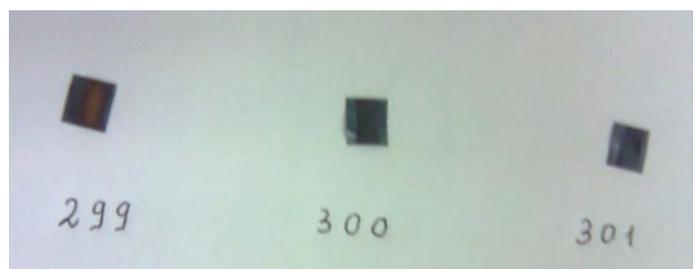


Figura 11. Tre campioni di SiNW depositi su substrato di acciaio

I campioni di nanofili di silicio (SiNW) si presentano, da un punto macroscopico, come dei quadratini di acciaio dalle dimensioni di circa 1x1 cm che rappresentano il substrato sul quale è stato depositato il silicio. La maggior parte dei campioni conteneva circa 0,1 mg di silicio, anche se alcuni campioni erano più massivi ed arrivavano a contenere anche quantità doppie. I campioni sono stati sottoposti ad un'analisi strutturale mediante diffrazione dei raggi X. I tre campioni esaminati hanno dato lo stesso risultato ed un tipico diffrattogramma è riportato in Figura 12. I picchi che sono presenti sono tutti da ascrivere all'acciaio del substrato che contiene oltre al ferro anche nichel e cromo. Non si osservano i picchi caratteristici del silicio che pertanto potrebbe essere presente in una forma amorfa.

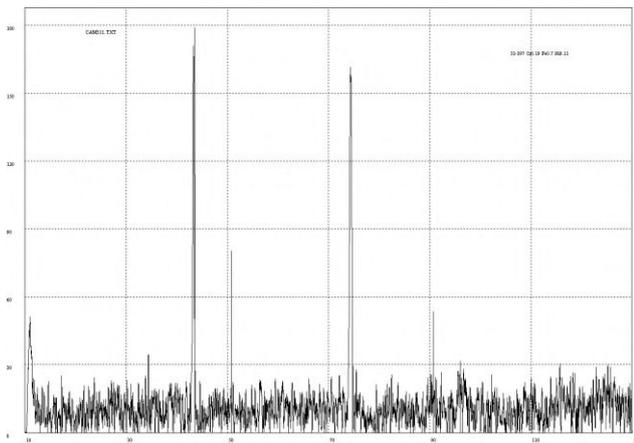


Figura 12. Diffrattogramma ai raggi X del campione di silicio depositato su acciaio, I picchi sono ascrivibili all'acciaio sul quale i nanofili di silicio sono stati depositati

L'analisi morfologica al microscopio elettronico a scansione a basso ingrandimento ha evidenziato una struttura filiforme molto intrecciata (Figura 13). A maggior ingrandimento si osservano i fili di silicio in

maggior dettaglio: questi sono lunghi diversi micron mentre hanno un diametro di dimensioni nanometriche. In Figura 14 si notano le esatte dimensioni del diametro dei nanofili di silicio che risultano essere comprese tra 310 e 430 nm. L'analisi di diffrazione elettronica ha evidenziato la presenza di silicio ma non di ossigeno e questo permette di escludere la presenza di silice nei campioni.

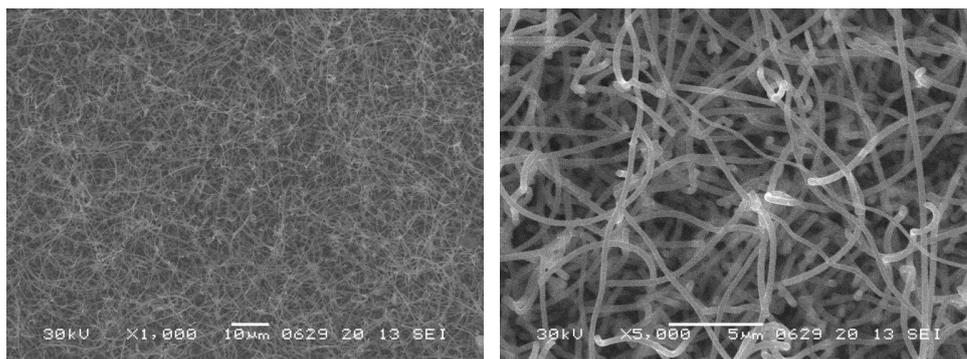


Figura 13. Immagini SEM dei nanofili di silicio, a diverso ingrandimento (x 1.000 a e x 5.000)

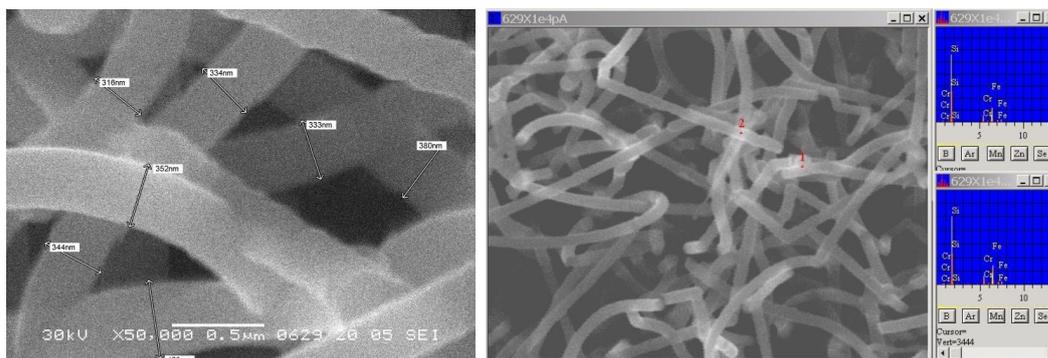


Figura 14. Immagini SEM dei nanofili di silicio ad elevato ingrandimento (x 50.000). A destra è mostrata l'analisi EDS eseguita su due posizioni contraddistinte dai numeri 1 e 2.

I campioni sono stati direttamente utilizzati per l'analisi elettrochimica inserendoli in celle elettrochimiche a due elettrodi in cui il contro elettrodo era costituito da un disco di litio. La prima prova effettuata è stata una ciclazione galvanostatica. Considerando i dati riportati in letteratura, la scarica è stata limitata a 5 mV vs Li/Li⁺ mentre in carica si è stabilito di raggiungere il valore di 1,4 V vs, Li/Li⁺. Il primo problema che si è presentato è stato quello di determinare la corrente di scarica. Considerando i dati indicativi forniti dai preparatori (deposito di circa 100 µg di silicio) e una capacità specifica teorica di 4200 mAh/g, segue che la capacità degli elettrodi dovrebbe essere

dell'ordine dei 420 μA , Per tale ragione si è pensato di condurre l'esperimento utilizzando una corrente di scarica e di carica pari a 10 μA . Il tempo di scarica è stimato pari a circa 42 ore (C/42 rate).

La Figura 15 mostra il profilo di potenziale per il primo ciclo di scarica e carica (a) e per i cicli successivi al primo (b) per uno degli elettrodi selezionati. Per il valore di capacità specifica si è usato un peso pari a 0,1 mg.

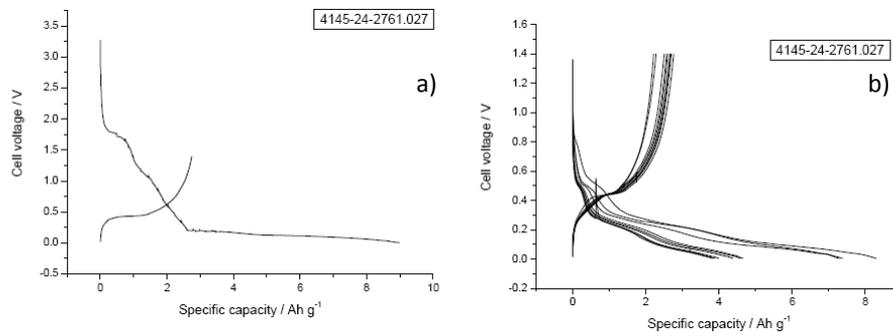


Figura 15. a) Profili di tensione per il primo ciclo di scarica e di carica eseguiti a 10 μA per la cella contenente i nanowires di silicio (campione 299); b) Profili di tensione per i cicli successivi al primo eseguiti alla stessa corrente

Si nota che durante il primo ciclo di scarica, la tensione di cella scende rapidamente per portarsi intorno ai 1,8 V. Dopo un breve lasso di tempo, il potenziale diminuisce ulteriormente e si porta a circa 0,2 V. Durante questo intervallo, l'elettrodo ha già scaricato 2500 mAh/g. Successivamente si assiste ad un lungo plateau che si estende per oltre 6000 mAh/g. Quando il potenziale raggiunge il valore di fine scarica, l'elettrodo ha accumulato una capacità di circa 9000 mAh/g. In carica il potenziale si porta rapidamente a circa 0,4 V. Dopo che l'elettrodo ha accumulato circa 1500 mAh/g il potenziale inizia a salire e raggiunge la condizione di fine carica dopo aver rilasciato circa 2700 mAh/g. La capacità rilasciata è pertanto solo il 30% di quella accumulata. Nei cicli successivi si assiste ad una progressiva diminuzione della capacità in scarica che diminuisce da 9000 mAh/g registrato al primo ciclo fino a 4000 mAh/g registrato al 10° ciclo. Al contrario la capacità in carica diminuisce leggermente portandosi fino a 2200 mAh/g. Questo comportamento indica che l'elettrodo è caratterizzato da un'elevata componente irreversibile che, pur diminuendo con la ciclazione rimane sempre presente, Al decimo ciclo la componente reversibile è pari al 58% della capacità in scarica. Questa componente irreversibile è probabilmente correlata alla decomposizione dell'elettrolita o del solvente sull'elettrodo di silicio.

Il secondo elettrodo ha mostrato un comportamento simile al primo, anche se le capacità registrate erano superiori. Anche in questo caso per il valore di capacità specifica si è usato un peso pari a 0,1 mg. Quando il potenziale raggiunge il valore di fine scarica, l'elettrodo ha accumulato una capacità di circa 1080 mAh/g. In carica il potenziale raggiunge la condizione di fine carica dopo aver rilasciato circa 3250 mAh/g. Anche in questo caso la capacità rilasciata è pertanto solo il 30% di quella accumulata. Nei cicli successivi si assiste ad una progressiva diminuzione della capacità in scarica e, in maniera meno evidente, in carica. Al decimo ciclo la capacità accumulata vale 4460 mAh/g mentre quella rilasciata è pari a 2990 mAh/g, per cui la componente reversibile è pari al 66% della capacità in scarica.

Per valutare la possibilità di aumentare il coefficiente di carica è stata effettuata una sperimentazione per cui l'elettrodo è stato ciclato variando il potenziale di fine scarica. Il potenziale è stato aumentato partendo da 0,005 V per sei volte, Le tensioni di fine scarica sono state: 0,005, 0,040, 0,075, 0,105, 0,140, 0,175 e 0,210 V. Il test è stato condotto utilizzando una corrente pari a 200 μA . Considerando la capacità erogata nel test condotto a 10 μA (2800 mAh/g), segue che la corrente di carica e scarica corrisponde ad una velocità pari a C/2,8. Per ogni potenziale di fine scarica sono stati effettuati cinque cicli per verificare l'effettivo valore del coefficiente di carica. La Figura 16 mostra la capacità specifica in carica e scarica ed il coefficiente di carica per i differenti valori di potenziale di fine scarica.

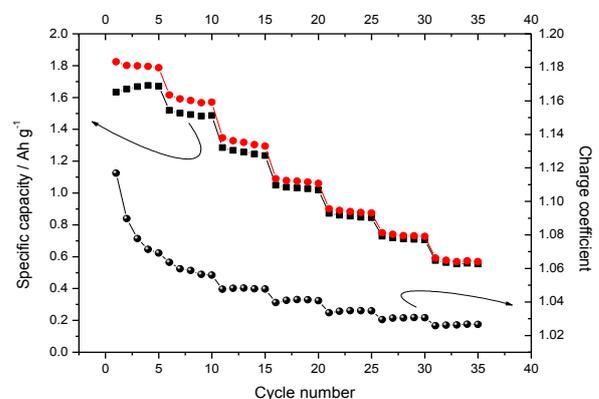


Figura 16. Capacità specifica in scarica (quadrati neri) e carica (punti rossi) e coefficiente di carica (rapporto tra la capacità in scarica rispetto a quella in carica, punti neri)

Si può notare che all'aumentare del potenziale di fine scarica diminuisce la capacità accumulata e, conseguentemente quella rilasciata. Il materiale, scaricato fino a 5 mV, riesce ad accumulare circa 1600 mAh/g (pari al 57% della capacità accumulata ad un rate di scarica 20 volte più lento). All'aumentare della tensione di fine scarica la capacità diminuisce progressivamente e parallelamente il coefficiente di carica diminuisce, mantenendosi però sempre ad un valore di poco superiore all'unità. Quando la tensione di fine carica è portata a 210 mV, la capacità specifica del materiale si è ridotta del 50% mentre il coefficiente di carica è sceso fino a 1,027. Per valutare l'effetto della ciclazione sulla capacità in carica dell'elettrodo, un altro elettrodo è stato ciclato galvanostaticamente a correnti di carica e scarica pari a 50 mA. In contemporanea è stata eseguita un'analisi spettroscopica a risposta di frequenza per valutare la resistenza al trasferimento di carica esibita dall'elettrodo. L'analisi spettroscopica di risposta di frequenza è stata effettuata all'inizio ed alla fine di ogni ciclo durante i primi quattro cicli. Dopo che la cella ha raggiunto il potenziale di fine carica o fine scarica, la stessa è lasciata a riposo per diverse ore prime di effettuare la misura di impedenza. Le analisi sono state effettuate da 65 KHz fino a 0,1 Hz con una differenza di potenziale di 10 mV e raccogliendo dieci misure per punto.

Al diminuire della resistenza al trasferimento di carica corrisponde un leggero aumento della capacità in carica. La cella è stata fatta poi ciclare, sempre a 50 μ A, per diversi cicli e la Figura 17 mostra i profili di tensione in funzione del tempo e la capacità specifica in carica e scarica ed il coefficiente di carica in funzione del numero dei cicli. Si può notare come la capacità in scarica sia sempre superiore a quella in carica. Mentre però la capacità in scarica tende a diminuire, quella in carica rimane pressoché costante, e pari a circa 1600 mAh/g (anche in questo caso è stato usato come peso il valore di 0,1 mg). Come conseguenza il coefficiente di carica tende a diminuire portandosi da 1,15 registrato al primo ciclo a circa 1,06 registrato al 32° ciclo.

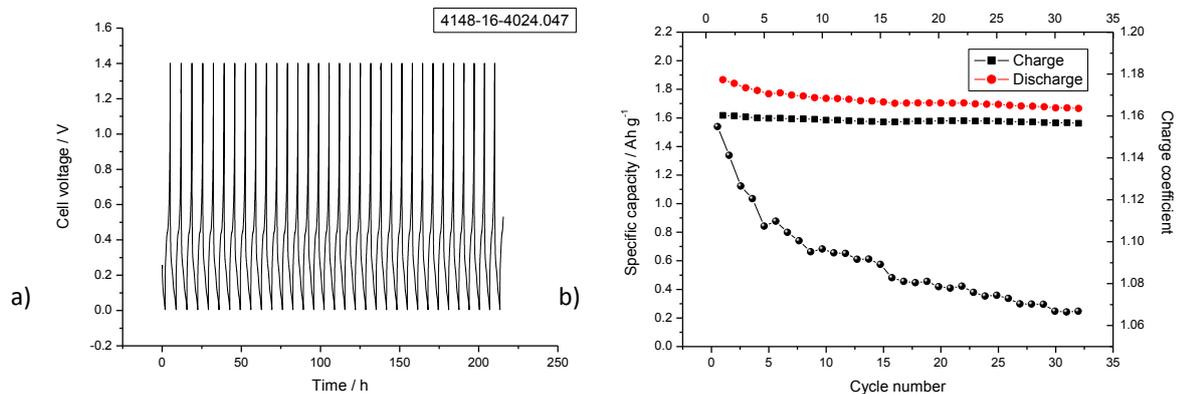


Figura 17. a) Profili di tensione per i primi trenta cicli per di carica e scarica per la cella contenente i nanowires di silicio e ciclata a 50 μ A; b) Capacità specifica in carica e scarica e coefficiente di carica

Conclusioni sugli anodi a base di SiNW

I campioni di silicio preparati con tecnica LPCVD si sono rivelati formati da nanofili molto estesi in lunghezza e variamente intrecciati tra loro con diametro compreso tra 310 e 430 nm. La diffrazione ai raggi X ha permesso di evidenziare l'assenza di qualsiasi struttura cristallina pertanto il materiale dovrebbe essere amorfo. L'analisi spettroscopica di diffrazione dei raggi X ha confermato che i nanofili contengono esclusivamente silicio. Entrambe queste tecniche hanno anche confermato che il substrato sul quale i nanofili sono stati depositati era costituito da una lega contenente ferro, nichel e cromo. I materiali, utilizzati come elettrodi in celle al litio metallico, hanno mostrato di essere capaci a formare leghe con il litio. La capacità durante il primo ciclo di scarica è stata superiore a quella teorica e solo il 30% di questa è stata poi recuperata in fase di carica. Questo risultato è da ascrivere ad un elevato valore della capacità irreversibile causata molto probabilmente dalla decomposizione dell'elettrolita e/o del solvente che lo solubilizza sulla superficie dei nanofili di silicio. A questo processo dovrebbe corrispondere la formazione dell'interfaccia elettrochimica solida, che dovrebbe impedire l'ulteriore decomposizione dell'elettrolita. In realtà, anche se in misura ridotta, la decomposizione dell'elettrolita continua anche nei cicli successivi al primo e questo è indice di una scarsa abilità da parte del SEI formatosi di favorire il processo di alligazione del litio con il silicio. Dopo alcuni cicli condotti con correnti molto basse (dell'ordine dei 10 μ A) il rapporto tra la capacità accumulata e quella fornita è salito fino al 66%, un valore sicuramente più elevato ma ancora troppo basso per permettere un corretto funzionamento dell'elettrodo in una batteria litio ione. Infatti in questo tipo di batteria l'unica fonte di litio è rappresentata da quello contenuto nel catodo e la perdita irreversibile e continua di litio causerebbe una morte prematura della batteria. Per valutare la possibilità di aumentare il coefficiente di carica è stata effettuata una sperimentazione per cui l'elettrodo è stato ciclato

variando il potenziale di fine scarica ad una corrente 20 volte più elevata rispetto a quella usata nella prima sperimentazione. L'aumento del potenziale di fine scarica determina una diminuzione della capacità accumulata e, conseguentemente, di quella rilasciata, e parallelamente una diminuzione del coefficiente di carica che però si mantiene sempre ad un valore di poco superiore all'unità. Quello che occorrerebbe valutare in una prossima sperimentazione è come varia la capacità reversibile in funzione del solvente e dell'elettrolita usato, in quanto la risposta delle differenti soluzioni elettrolitiche potrebbe essere molto differente da quella della soluzione di LP 40 usata in questa sperimentazione. Le capacità esibite dagli elettrodi sottoposti a ripetute ciclagioni hanno mostrato una lieve perdita in funzione del numero dei cicli. Il materiale in queste condizioni ha ciclato circa 1,6 Ah/g con una minima perdita di capacità. Sempre tenendo presente il fatto che la tecnica LPCVD è di difficile scalabilità, per cui è inadatta per ottenere quantità di materiale tali da poter essere utilizzato in accumulatori dimostrativi o di taglia significativa, si ritiene che occorre studiare in maggior dettaglio il materiale prodotto tramite questa tecnica proprio per le potenzialità che la caratterizzazione elettrochimica ha evidenziato.

Preparazione di materiali anodici e catodici in scala utile per la verifica degli effetti dello scale up di produzione sulle prestazioni dei materiali

L'ENEA ha svolto molteplici attività di ricerca su materiali anodici e catodici per celle al litio adatte per le applicazioni nelle reti elettriche. Tali materiali, a base di ferro e titanio, sono stati scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), costo contenuto e basso impatto ambientale. La sintesi dei materiali è stata ottimizzata per aumentare le prestazioni dei materiali e favorire lo scale-up verso la produzione di alcune decine di grammi di prodotto. Tramite tali sintesi, i materiali sono stati prodotti in scala utile per la verifica degli effetti dello scale up di produzione su prestazioni e costi. Infine i materiali sono stati utilizzati per la realizzazione di accumulatori di scala dell'ordine delle centinaia di mAh. In particolare, in questo paragrafo è descritto lo sviluppo di materiali catodici a base di LiFePO_4 e di materiali anodici a base di TiO_2 . Tale scelta è dettata dal basso costo e dalla elevata disponibilità dei materiali di partenza.

Sono state apportate modifiche ai processi di sintesi, messi a punto negli anni precedenti, in modo da poter essere adattati alle esigenze produttive di quantità maggiori di prodotto. In particolare, per quanto riguarda la sintesi del LiFePO_4 è stato valutato l'effetto della preparazione dei precursori e l'effetto delle condizioni di reazione sulle proprietà elettrochimiche dei prodotti mentre per il TiO_2 è stata valutata sia la possibilità di usare materiali commerciali (Degussa P25, Tyzor) che materiali preparati per sintesi elettrochimica (nanotubi di carbonio). Le caratteristiche morfologiche sono state valutate tramite microscopia elettronica a scansione, mentre la composizione chimica attraverso spettroscopia di perdita di energia di elettroni (EELS). Infine le caratteristiche strutturali sono state determinate tramite diffrazione dei raggi X. I materiali ottenuti sono stati utilizzati per la preparazione di elettrodi, le cui prestazioni elettrochimiche sono state valutate tramite ciclagioni galvanostatiche effettuate a diversa velocità di scarica.

Preparazione di LiFePO_4

Il materiale catodico LiFePO_4 è stato preparato con un metodo a due step. E' stato preparato il precursore, a base di FePO_4 e quindi il FePO_4 è stato litiato tramite l'aggiunta di un opportuno agente chimico contenente litio.

Il precursore per la sintesi del LiFePO_4 è ottenuto a partire da Fe(III)SO_4 tramite un metodo di precipitazione ad umido (materiale A); oppure a partire da Fe(III)PO_4 con una riduzione del fosfato di ferro tramite idrogeno (materiale B). Sono state effettuate differenti reazioni del precursore variando l'agente litiante. Sono stati testati differenti sali di litio, con carattere più o meno riducente. I sali di litio provati sono stati l'idruro, l'idrossido, l'acetato, il cloruro, lo ioduro, il carbonato ed il solfuro.

Per la preparazione del LiFePO_4 sono state utilizzate diverse procedure:

- trattamento termico del precursore con il litio ioduro
- trattamento del precursore con litio idrossido
- trattamento del precursore con litio cloruro
- trattamento del precursore con litio acetato
- trattamento del precursore con litio carbonato
- trattamento del precursore con litio solfuro.

I procedimenti e le caratterizzazioni di ogni singola preparazione sono ampiamente descritti nel rapporto RdS/2013/240. Tutti i campioni prodotti sono stati sottoposti allo stesso processo di preparazione di elettrodi e a successiva caratterizzazione elettrochimica in celle da laboratorio

Per ottimizzare la preparazione dei campioni di LiFePO_4 sono state condotte ulteriori caratterizzazioni elettrochimiche, scegliendo, tra i differenti agenti litiati, lo ioduro di litio in quanto è quello che fornisce il miglior

risultato elettrochimico. Utilizzando questo reagente sono state effettuate differenti reazioni variando il tempo e la temperatura di reazione, in modo da verificarne l'effetto sul comportamento del LiFePO_4 . In particolare sono stati oggetto di indagine sia la reazione di riduzione del precursore A (FePO_4) che quella di formazione del prodotto finale (LiFePO_4).

A titolo puramente esemplificativo si riportano in Figura 18 i risultati che sono ottenuti durante una ciclazione galvanostatica su una delle celle da laboratorio realizzate, integrata dalla caratterizzazione cristallografica. Uno degli elettrodi è inserito in una cella al litio e ciclato galvanostaticamente a C/10. La cella ha effettuato circa 1000 cicli, mostrando una capacità specifica elevata e stabile (Figura 18b).

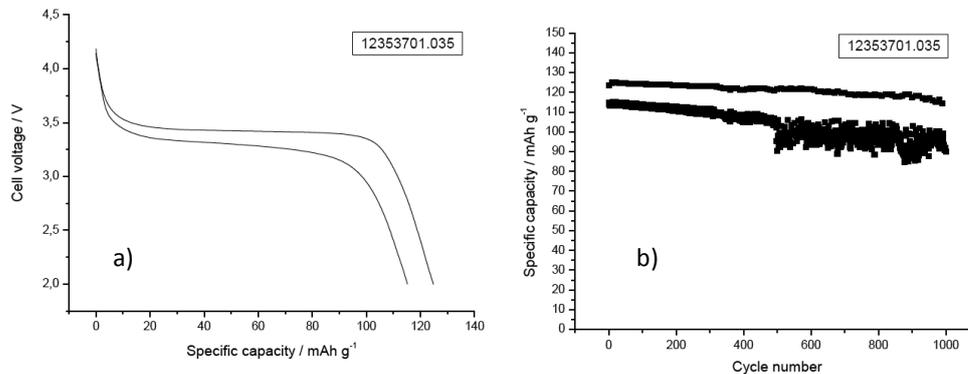


Figura 18. a) Profili di tensione per i primi due cicli per la cella contenente LiFePO_4 ottenuto utilizzando il litio ioduro come agente litante e ciclata a C/10 rate e C/rate; b) Variazione della capacità specifica in funzione del numero di cicli per la stessa cella ciclata a C_{rate}. Ogni 10 cicli un ciclo è stato effettuato un ciclo a corrente ridotta (C/10). Il FePO_4 è stato scaldato a 400°C per 30 minuti, mentre la litiazione è stata condotta a 400°C/15' e 550°C/30'

La Figura 19 mostra un altro esempio dei risultati ottenuti con le ciclazioni: la capacità in funzione della corrente di scarica (sinistra) e del numero dei cicli (destra).

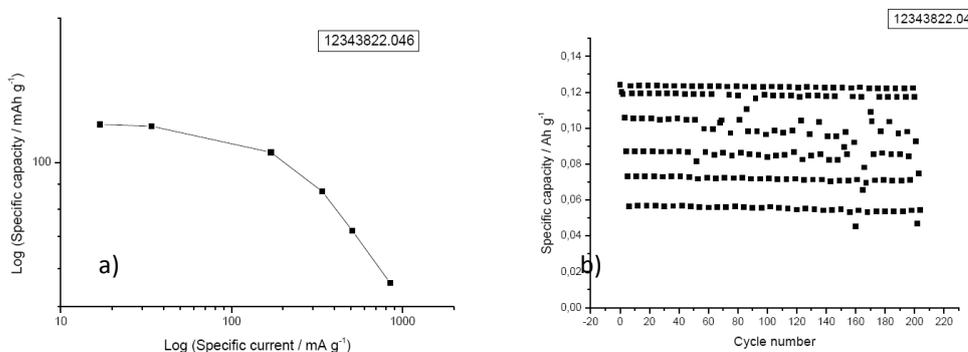


Figura 19. a) Grafico in doppio logaritmico riportante la capacità specifica in funzione della corrente specifica per la cella contenente LiFePO_4 ottenuto utilizzando il litio ioduro come agente litante; b) Variazione della capacità specifica in funzione del numero di cicli per la stessa cella ciclata a differenti rate di scarica C/10, C/5, C/2, C, 3C e 5C. Il FePO_4 è stato scaldato a 280°C per 30 minuti mentre la litiazione è stata condotta a 400°C/15' e 550°C/15'

Preparazione e caratterizzazione dell'ossido di titanio

Analogamente con quanto fatto per il materiale catodico, sono stati preparati od acquistati diversi campioni di titanio adatto per l'uso in celle al litio. La ricerca si è concentrata su:

- titanio ossido Degussa
- nanotubi di titanio ossido
- titanio ossido da lattato.

Il *titanio ossido Degussa* (prodotto commerciale Evonik P25) è stato caratterizzato mediante analisi cristallografica ai raggi X. Quindi si è provveduto a preparare degli elettrodi per la caratterizzazione elettrochimica.

La figura 20 mostra il diffrattogramma del titanio ossido Degussa, il materiale è stato identificato come TiO_2 con struttura anatase. Nella struttura ai raggi X è possibile evidenziare, oltre ai picchi tipici della fase anatase, anche un

picco a 27,4 tipico della fase rutilo. Alcuni lavori hanno anche dimostrato che il Degussa P25 contiene anche una fase amorfa (e quindi non individuabile ai raggi X) di TiO_2 . La composizione tipica cristallina del P25 è stata valutata essere 78% anatasio e 14% rutilo.

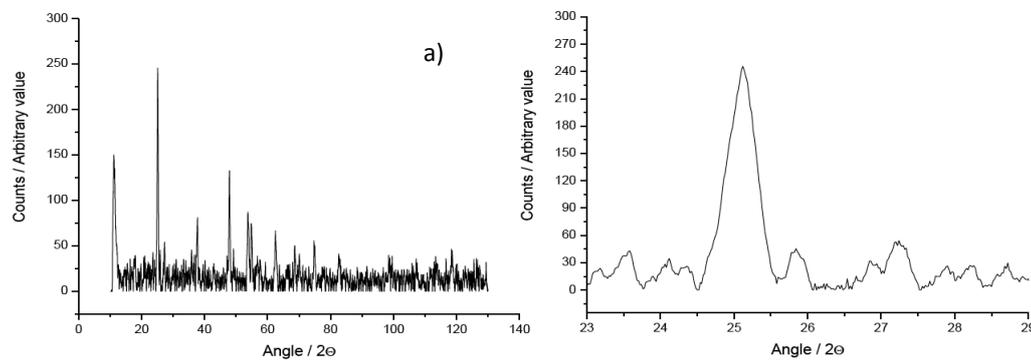


Figura 20. a) diffattogramma ai raggi X del campione di TiO_2 P25 della Degussa; b) Allargamento del diffattogramma di sinistra nel range 23-29 gradi

La Figura 21 mostra i risultati della caratterizzazione elettrochimica eseguita su un elettrodo a base di P25 ciclato tra 1,4 e 2,5 V a C/10 rate. Sulla sinistra è possibile osservare i profili di tensione in funzione della capacità, mentre sulla destra sono riportati la capacità specifica (riferita al peso del materiale attivo) e il coefficiente di carica in funzione del numero dei cicli. Il profilo di tensione registrato durante la prima scarica è diverso dai seguenti cicli.

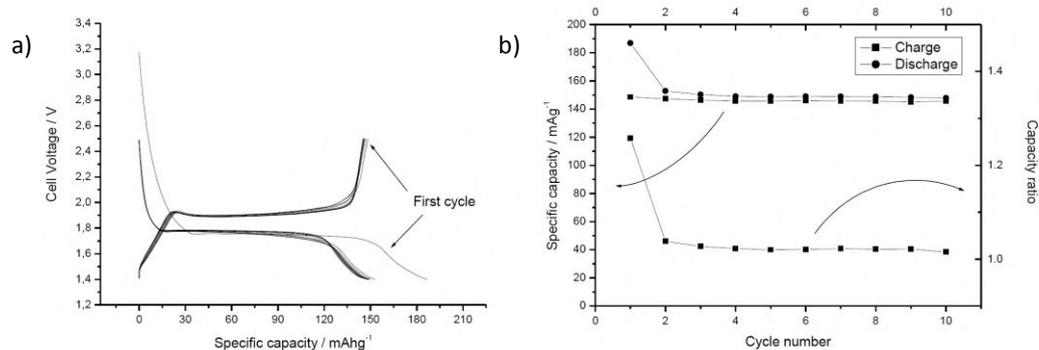


Figura 21. a) Profili di tensione per i primi dieci cicli per la cella contenente TiO_2 Degussa P 25 e ciclata a C/10 rate; b) Capacità specifica in carica e scarica e coefficiente di carica

La tensione iniziale dell'elettrodo appena preparato era di 3,2 V. Dopo aver iniziato la scarica, la tensione dell'elettrodo diminuisce per raggiungere un plateau a 1,75 V vs. Li. Al termine del primo ciclo di scarica l'elettrodo è stato in grado di intercalare 190 mAh per grammo di materiale attivo. Durante la carica la tensione raggiunge rapidamente un plateau localizzato a 1,89 V vs Li. Al termine della carica l'elettrodo riesce a de-intercalare circa 150 mAh per grammo di materiale attivo prima di raggiungere la tensione di fine carica. Il materiale presenta un irreversibile al primo ciclo capacità di circa il 21% della capacità iniziale scaricata. Il coefficiente di carica al primo ciclo è pari a 1,22. A partire dal secondo ciclo, il coefficiente di carica diminuisce sensibilmente raggiungendo un valore di poco superiore all'unità.

Per valutare la ciclabilità del P25 a differenti rate di scarica, l'elettrodo è stato caricato con differenti correnti, corrispondenti a rate di carica di C/10, C/5, C/2, 1C, 2C e 3C. Alla corrente massima di carica (3C) l'elettrodo è stato in grado di fornire 40 mAh/g (circa il 27% della capacità liberata a C/10) con una tensione media di carica di 2,18 V. La capacità di ritenzione dopo 900 cicli è stata dell'89% durante il ciclo di prova e il 66% durante i cicli veloci.

Per la preparazione e caratterizzazione di *nanotubi di titanio ossido*, è stato sviluppato un processo per la crescita dei nanotubi di titanio ossido (NTO) che ha utilizzato come substrato dei sottili fogli commerciali di titanio puro di grado 3 (Titania, Italia). I fogli di titanio avevano dimensioni di 55 mm × 15 mm con uno spessore di 0,5 mm, e sono stati rivestiti superficialmente di un materiale non conduttore al fine di mostrare un'area attiva di 1 cm². I fogli di titanio sono stati decappati in superficie tramite immersione per 3 minuti in una soluzione preparata solubilizzando 10 ml di una miscela di acido fluoridrico ed acido nitrico con rapporto volumetrico di HF/HNO₃ pari 1:3 in acqua deionizzata e portando il volume finale a 100 ml. Prima della crescita dei NTO, i fogli di titanio sono

stati anodizzati in una cella a tre elettrodi contenente una soluzione di KOH 1M. Il contro-elettrodo era un foglio di platino, mentre il riferimento era un elettrodo a calomelano standard. Una corrente (1 mA/cm^2) generata da un potenziostato/galvanostato (Solartron 1286) è stata fatta scorrere nella cella per 3 min, per generare sui fogli di titanio uno strato di ossido compatto. La crescita delle NTO è stata effettuata potentiostaticamente utilizzando la stessa cella e sostituendo l'elettrolita con una soluzione di glicole etilenico contenente 1% in peso di acqua e lo 0,20% in peso di NH_4F . L'anodizzazione è stata effettuata facendo passare la corrente per 3 ore con una differenza di potenziale di 60 V. La morfologia e la composizione del materiale sono state valutate con un microscopio elettronico a scansione, con spettroscopia di perdita di energia di elettroni.

Nastri di elettrodi compositi sono stati ottenuti tramite calandratura a rullo delle miscele prodotte. Gli elettrodi, estratti dai nastri (per punzonatura) in forma di dischi, tipicamente con un diametro di 8-10 mm, sono stati montati su raccordi per tubi di tipo T in polipropilene usati come celle elettrochimiche equipaggiate con tre collettori di corrente cilindrici in acciaio inox (SS316). Per valutare le proprietà degli elettrodi, è stato utilizzato litio metallico sia come anodo che come elettrodo di riferimento mentre come separatore è stato utilizzato un setto in fibra di vetro. Dalle immagini SEM dei nanotubi di titanio (Figura 22) è possibile valutare parametri geometrici quali: la lunghezza media ed i diametri esterni ed interni medi, che sono intorno a $7\mu\text{m}$ (Figura 22a), 200nm (Figura 22b) e 100 nm (Figura 22c), rispettivamente. La superficie del nanotubo è liscia, ma non lucida.

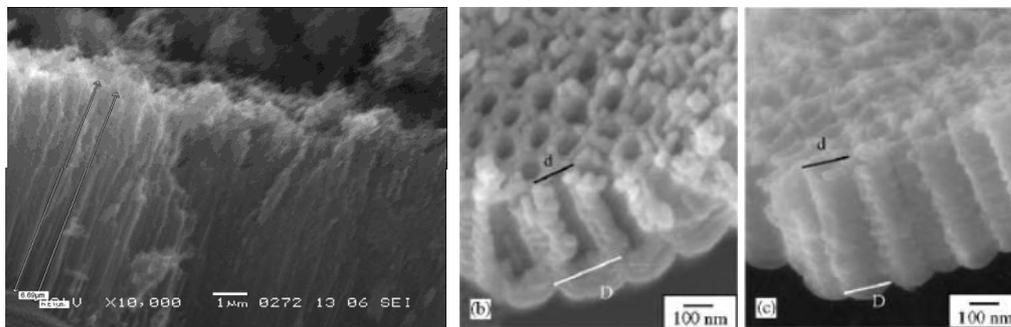


Figura 22. Immagine SEM dei nanotubi di TiO_2

La Figura 23 mostra i risultati dell'analisi XRD. Mentre i NTO formati dopo il processo di anodizzazione sono amorfi (dato non mostrato), il campione riscaldato a 400°C per 1 h è cristallizzato nella fase anatase. La presenza di TiO_2 fase rutilo è esclusa dal fatto che il picco caratteristico situato a $27,4^\circ$, appartenente alla fase rutilo, è assente.

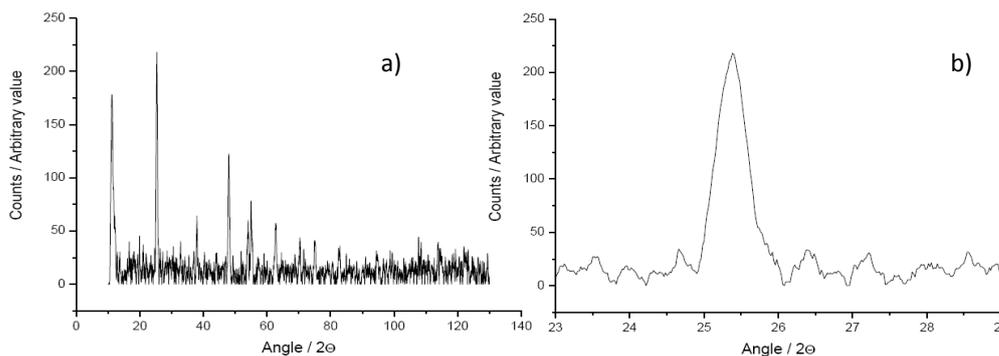


Figura 23. a) Diffattogramma ai raggi X del campione di nanotubi di TiO_2 ; b) Allargamento del diffattogramma nel range 23-29 gradi

Per avere una capacità di ritenzione del 50% rispetto alla capacità C/10, la corrente specifica deve essere limitata a 200 mAh/g . La capacità di ritenzione (stabilità e durata) durante la vita operativa è illustrata in Figura 24, ove la capacità specifica è riportata in funzione del numero di cicli. La cella è stata scaricata a velocità pari a C rate. Ogni 100 cicli è stato effettuato un ciclo di test condotto a corrente ridotta (C/10) per valutare la capacità specifica a basso rate di scarica. La Figura 24 a sinistra mostra i profili di potenziale in carica e scarica registrati durante il ciclo di test a corrente ridotta ed il ciclo veloce, mentre a destra presenta la variazione della capacità specifica in funzione del numero dei cicli. Il materiale ha mostrato una buona capacità di ritenzione della capacità sia durante il ciclo di prova sia durante i cicli veloci. La capacità di ritenzione dopo 1000 cicli è stata del 99% durante il ciclo di prova e del 77% durante i cicli veloci.

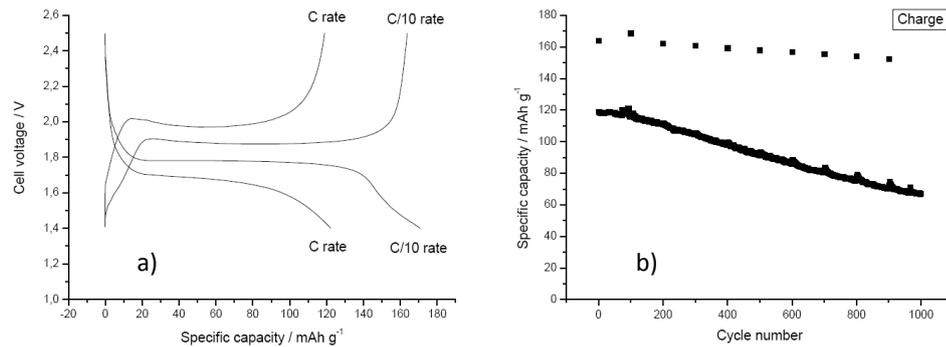


Figura 24. a) Profili di tensione per i primi due cicli per la cella i nanotubi di TiO₂ e ciclata a C/10 rate e C/ rate; b) Variazione della capacità specifica in funzione del numero di cicli per la stessa cella ciclata a C rate. Ogni 100 cicli è stato effettuato un ciclo a corrente ridotta (C/10).

Preparazione e caratterizzazione di titanio ossido lattato contenente carbone (TOL-C)

Uno dei problemi incontrati con l'uso del titanio ossido è legato alla bassa conducibilità del materiale che risulta essere un forte isolante. Il TYZOR[®]-LA (titanato organico, un prodotto commerciale prodotto dalla DuPont) si presenta particolarmente adatto per essere mescolato con carbone al fine di aumentare la conducibilità elettrica.

Il materiale TOL-C è stato preparato aggiungendo il carbone (Super P) alla soluzione di TYZOR[®]-LA e sonicando per diverse ore per determinare la dispersione del carbone all'interno della soluzione. Sono stati preparati 0,534 mg di titanio ossido da lattato contenente 0,47 g di titanio ossido (88% in peso) e 0,064 g di carbone (12% in peso). La soluzione contenente carbone è stata trattata al fine di ottenere il materiale attivo. In particolare la soluzione di TYZOR[®]-LA/Super P è stata evaporata sotto vuoto ed il residuo è stato calcinato sotto azoto a 400 °C per 1 ora. Con il materiale così ottenuto sono stati preparati degli elettrodi. Gli elettrodi sono inseriti in due celle al litio e ciclata galvanostaticamente a C/10.

La Figura 25 mostra i risultati della caratterizzazione elettrochimica eseguita su un elettrodo a base TOL-C ciclato tra 1,4 e 2,5 V a C/10 rate. Sulla sinistra è possibile osservare i profili di tensione in funzione della capacità, mentre

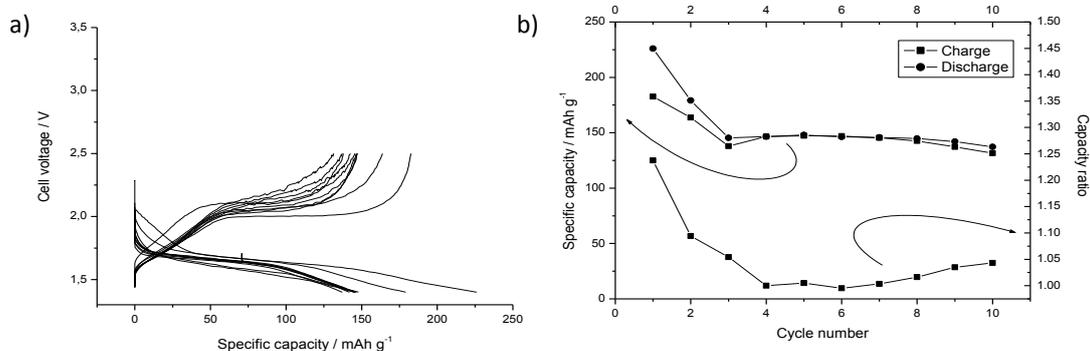


Figura 25. a) Profili di tensione per i primi dieci cicli per la cella contenente il TiO₂ TYZOR[®]-LA aggiunto di carbone Super P e ciclata a C/10 rate; b) Capacità specifica in carica e scarica e coefficiente di carica

sulla destra sono riportati la capacità specifica e il coefficiente di carica in funzione del numero dei cicli. In questo caso il profilo di tensione registrato durante i primi tre cicli di scarica/carica differisce dai seguenti cicli. La tensione iniziale dell'elettrodo appena preparato era di 2,25 V. Dopo aver iniziato la scarica, la tensione dell'elettrodo diminuisce per raggiungere un plateau a 1,75 V vs. Li. Al termine del primo ciclo di scarica dell'elettrodo è stato in grado di intercalare 225 mAh per grammo di materiale attivo. Durante la carica la tensione raggiunge rapidamente un plateau localizzato ad oltre 2,00 V vs Li. Al termine della carica l'elettrodo riesce a de-intercalare circa 183 mAh per grammo di materiale attivo prima di raggiungere la tensione di fine carica. Il coefficiente di carica al primo ciclo è pari a 1,283.

Al termine del secondo ciclo di scarica la capacità specifica dell'elettrodo è pari a 180 mAh per grammo di materiale attivo. Al termine del secondo ciclo di carica l'elettrodo riesce a de-intercalare circa 165 mAh per grammo. Il coefficiente di carica al secondo ciclo scende a 1,09. Al termine del terzo ciclo di scarica la capacità specifica dell'elettrodo è pari a 147 mAh per grammo di materiale attivo. Al termine del terzo ciclo di carica

l'elettrodo riesce a de-intercalare circa 138 mAh/g. Il coefficiente di carica al terzo ciclo scende a 1,05. A partire dal quarto ciclo, il coefficiente di carica raggiunge un valore di poco superiore, all'unità (1,003) per poi aumentare nuovamente nei cicli successivi. Il valore raggiunto al 10° ciclo è di 1,044.

Scale-up di produzione del LiFePO₄

Per essere in grado di produrre celle elettrochimiche in scala significativa si è reso necessario studiare e sviluppare processi di preparazione diversi da quelli analizzati ed ottimizzati per lo studio dei materiali e dei relativi processi. Nel caso del LiFePO₄, lo scale up è stato portato avanti utilizzando la procedura di preparazione messa a punto in precedenza (descritta nei dettagli nel rapporto RdS/2013/240).

Il materiale prodotto è stato utilizzato per la realizzazione di due batterie al litio: 0,416 mg del materiale (75% in peso) sono stati mescolati con 94 mg di carbone KJB (17% in peso). Dopo intensa omogeneizzazione si aggiungono 44 mg di Teflon (8% in peso). Si trasforma la miscela in un materiale plastico che è calandrato fino a 200 µm sotto la pressa. Si ottiene in tal modo un foglio dallo spessore di 90 µm. Dal foglio si ritagliano due elettrodi circolari da 8 mm dal peso di 7,8 mg. La capacità degli elettrodi è pari a 1,00 mAh. Uno degli elettrodi è inserito in una cella al litio e ciclato galvanostaticamente a C/10 (Figura 26a). Un'altra cella è fatta partire con un ciclo a C/10 e 10 cicli a C/rate (Figura 26b). Il materiale è capace di ciclare reversibilmente circa 130 mAh/g con una buona ritenzione della capacità all'aumentare del numero dei cicli.

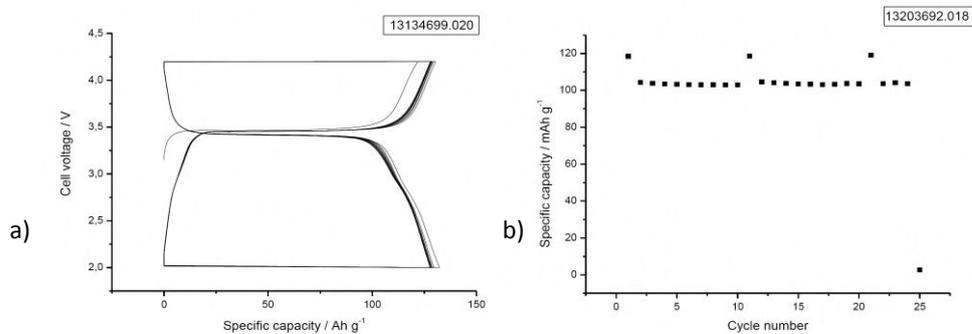


Figura 26. a) Profili di tensione per i primi dieci cicli per la cella ciclata a C/10; b) Variazione della capacità specifica in funzione del numero di cicli per la stessa cella ciclata a C rate. Ogni 10 cicli è stato effettuato un ciclo a corrente ridotta (C/10)

Scale-up di produzione del TOL-C (Titanio ossido da lattato contenente carbone)

Anche per il materiale anodico più promettente è stato studiato un processo adeguato per ottenere maggiori quantità di materiale attivo da utilizzare in celle di taglia maggiore. Lo scale up del materiale a base di titanio ossido contenente carbone (TOL-C) è stato preparato aggiungendo il carbone (Super P) alla soluzione di TYZOR®-LA e sonicando per diverse ore per determinare la dispersione del carbone all'interno della soluzione. Sono stati preparati 5.34 g di titanio ossido da lattato contenente 4,7 g di titanio ossido (88% in peso) e 0,64 g di carbone (12% in peso). Il materiale è stato quindi calcinato sotto azoto a 400°C per 2 ore. Il materiale è stato sottoposto ad un'analisi di diffrazione (Figura 27). In analogia con quanto trovato in precedenza il materiale si presenta quasi amorfo anche dopo il processo di riscaldamento a 450 °C per 2 ore. La presenza di una piccola frazione di

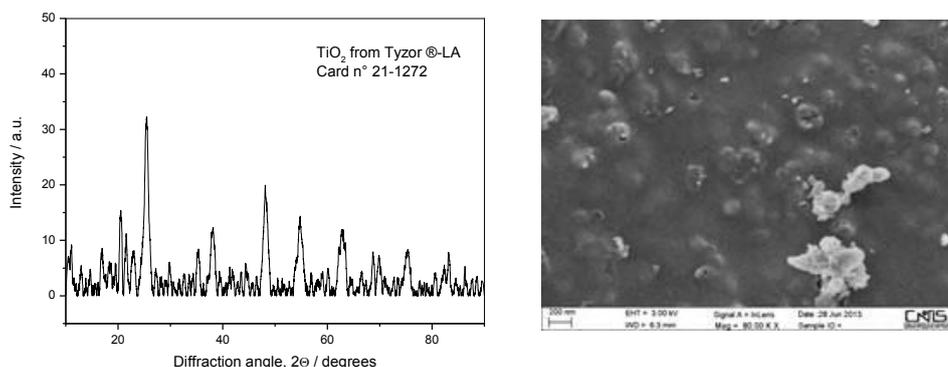


Figura 27. Diffratogramma ai raggi X del campione di TOL-C e immagine SEM del materiale

una fase cristallina non può essere completamente esclusa per la presenza di due picchi caratteristici appartenenti alla fase anatasio (e situato a 25,30° e 48,09). Nella stessa figura a destra è possibile osservare un'immagine al microscopio elettronico del materiale che si presenta molto omogeneo, con una superficie piana su cui è possibile osservare alcune protuberanze probabilmente formate dal gas che si sviluppa durante la decomposizione del chelato.

Conclusioni sulla preparazione di anodi e catodi e relativo scale up

Le attività svolte hanno permesso di mettere a punto una metodica di produzione del LiFePO_4 a partire dal FePO_4 per litiazione chimica e contemporanea riduzione. Tale metodo è stato opportunamente scalato per la produzione di batch di materiale da circa 30 grammi ciascuno. Le proprietà chimico fisiche del materiale ottenuto si sono dimostrate simili a quelle di materiali prodotti in precedenza in preparazioni da pochi grammi. Analogamente sono state studiate sintesi alternative per la preparazione di TiO_2 nanostrutturato ed elettrochimicamente attivo alternativo all'anodizzazione di lastre di titanio e tali da poter essere facilmente prodotte in quantità maggiori. In particolare la sintesi di TiO_2 contenente carbone a partire da titanio ossido lattato (TOL-C) si è dimostrata una via capace di produrre un materiale dalle capacità elettrochimiche paragonabili ad altri materiali nano strutturati e suscettibile di scale-up. Il materiale preparato in quantità maggiori ha dimostrato capacità paragonabili a quello prodotto in piccole quantità. In definitiva è possibile affermare che le due vie sintetiche messe a punto per la preparazione di anodi e catodi per batterie litio ione è un processo scalabile da pochi grammi a decine di grammi.

Realizzazione e caratterizzazione di celle litio-ione complete per la verifica delle prestazioni in condizioni operative

Le attività di ricerca sui materiali per celle Li-ione si è conclusa con la realizzazione e caratterizzazione di due tipologie di celle complete di elettrolita, opportunamente progettate: 1) in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale dei nuovi materiali anodici e catodici più recenti ed innovativi; 2) in taglia significativa (centinaia di mAh) con materiali ottimizzati sulla base di risultati degli anni precedenti di cui viene fatta l'analisi definitiva in base allo scale up di processi preparativi e di celle a design ottimizzato. L'attività [rapporto RdS /2013/242] in sintesi è stata svolta nel modo seguente:

- Inizialmente sono stati preparati il materiale catodico e anodico ottimizzato in quantità necessaria per la realizzazione di celle di piccola taglia. In particolare è stato sintetizzato circa un grammo di LiFePO_4 (capacità specifica reale 140 mAh/g) e circa un grammo di nanotubi di TiO_2 nanostrutturato (capacità specifica reale 160 mAh/g).
- Con i materiali prodotti sono stati realizzati degli elettrodi in scala significativa (300-500 mAh) che sono poi stati testati elettrochimicamente in celle di piccola taglia da 0,5 cm² al litio metallico in elettrolita liquido (LP30) per valutarne la corrispondenza alle specifiche tecniche ottenute negli anni precedenti. Per ottenere questo risultato i materiali sono stati mescolati con carbone in percentuale del 15% e con PVdF in percentuale del 5% e sospesi in adatto solvente organico. Quindi si è provveduto a realizzare delle stese di circa 200 cm² tali da ottenere una densità di materiale attivo compresa tra 15 e 20 mg/cm² per il LiFePO_4 . Le stese di TiO_2 avevano una densità di materiale attivo compresa tra 10 e 15 mg/cm².
- Infine gli elettrodi sono stati utilizzati per la preparazione di celle complete $\text{LiFePO}_4/\text{TiO}_2$ da circa 40-50 cm², per valutarne le proprietà in batterie di taglia significativa.

Realizzazione di batterie litio-ione di piccola taglia con i materiali ottimizzati

E' stata realizzata una batteria litio ione del tipo $\text{LiFePO}_4/\text{TiO}_2$ assemblando a sandwich un elettrodo a base di TiO_2 , con funzione di anodo e uno a base di LiFePO_4 , come catodo.

Le prove di ciclazione sono state effettuate automaticamente con un ciclatore per batterie (Maccor 4000). L'elettrodo a base di LiFePO_4 aveva un peso di circa 12,4 mg con un carico catodico pari a 9,3 mg. Considerando la capacità specifica del materiale valutata durante i cicli a C/10 rate (150 mAh/g) la capacità dell'elettrodo era circa 1,4 mAh. L'elettrodo a base di TiO_2 aveva un peso di circa 7,3 mg con un carico anodico pari a 5,5 mg. Durante il primo ciclo di scarica a C/10 rate il materiale anodico aveva mostrato una capacità specifica pari a 212 mAh/g. Usando questo valore la capacità dell'elettrodo è stata valutata pari a 1,16 mAh. Da questo calcolo risulta che la cella era limitata dall'anodo e che la capacità del catodo era circa il 12% superiore alla capacità dell'anodo. La batteria litio-ione è stata fatta ciclare a C/10 rate per dieci cicli. La quantità totale di corrente di carica immagazzinata è stata di 1,26 mAh (di poco superiore alla capacità dell'anodo).

La Figura 28b riassume i risultati in un grafico doppio logaritmico in cui l'energia specifica è riportata in funzione della potenza specifica (plot di Ragone). I valori specifici sono stati riferiti alla somma dei pesi dei materiali attivi contenuti nei rispettivi elettrodi. A bassa potenza specifica (8 W kg^{-1}) la cella era in grado di stoccare 73 Wh kg^{-1} di energia. L'energia specifica diminuisce con l'aumentare della potenza specifica e la cella è in grado di stoccare 15 Wh kg^{-1} di energia quando è scaricata a 190 W kg^{-1} .

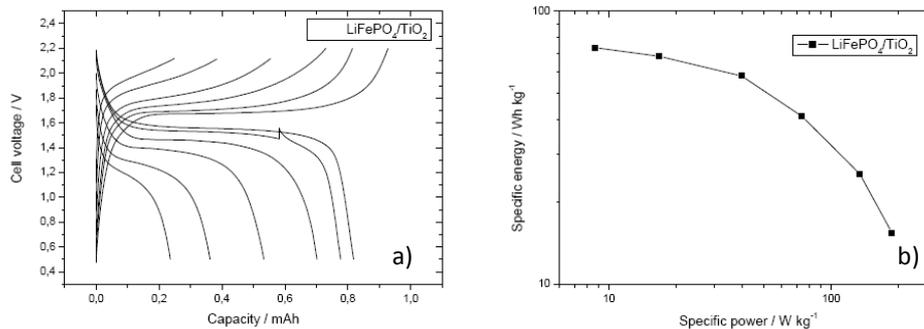


Figura 28. a) Profili di tensione di carica/scarica per la cella litio-ione e ciclata a varie velocità di scarica in funzione della capacità erogata. La cella è stata caricata e scaricata a C/10, C 5, C/2, 1C, 2C e 3C rate; b) grafico doppio logaritmico dell'energia specifica in funzione della potenza specifica (plot di Ragone). I valori specifici sono stati calcolati basandosi sulla somma del peso dei materiali attivi contenuti in entrambi gli elettrodi

La Figura 29 mostra l'andamento del ciclo di vita di due batterie agli ioni di litio basate sulla coppia LiFePO₄/TiO₂.

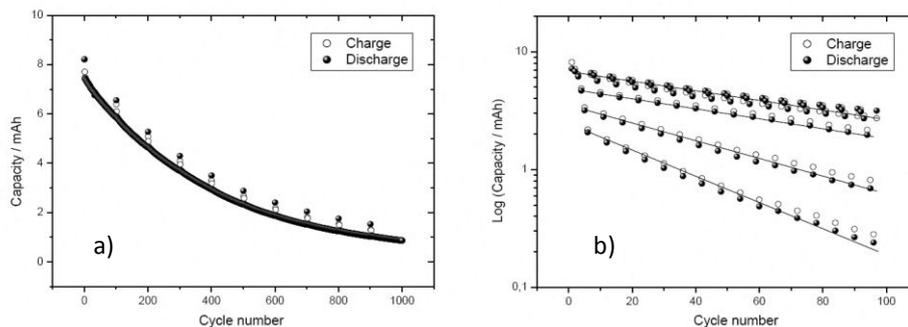


Figura 29. Capacità specifica in funzione del numero di cicli per due celle agli ioni di litio basate sulla coppia LiFePO₄/TiO₂. a) La cella è stata ciclata a C rate. Ogni 100 cicli è stata effettuata un ciclo di prova a corrente ridotta (C/10) per valutare la capacità specifica a bassa velocità di scarica; b) Grafico semi-logaritmico della capacità in funzione del numero di cicli per una cella scaricata a rate pari a C/10, C / 5, C / 2, 1C, 2C e 3C

Sulla sinistra è possibile osservare la variazione della capacità in funzione del numero di cicli per una cella scaricata a C rate. Per valutare la capacità specifica a bassa velocità di scarica un ciclo di prova a corrente ridotta (C/10) è stato effettuato ogni 100 cicli. Dal grafico si nota come la capacità diminuisce seguendo un andamento riconducibile ad un decadimento esponenziale di primo ordine.

La figura 29b mostra il diagramma semi logaritmico della capacità in funzione del numero di cicli per una cella scaricata a varie velocità. Come è possibile osservare dalla pendenza delle curve, la perdita di capacità in funzione del numero dei cicli aumenta all'aumentare della corrente di scarica.

Preparazione e caratterizzazione di celle litio-ione di taglia significativa

Per la preparazione di celle litio-ione di maggiori dimensioni, è stato necessario preparare stese anodiche e catodiche adeguate. I materiali attivi utilizzati per la preparazione degli anodi e catodi per batterie litio ione sono stati LiFePO₄ e TiO₂. Come conduttore elettronico è stato utilizzato il carbone Super P e come legante il copolimero polivinilidene difluoruro-esafuoro propilene (PVDF-HFP). Il copolimero è sciolto in cicloesano, mentre lo ftalato dibutile (BDH) è stato utilizzato come elasticizzante. Le stese sono state effettuate utilizzando come supporto un foglio di alluminio.

La scelta del modo di procedere dipende da una serie di fattori derivanti dalle proprietà del sistema filler inorganico/polimero/solvente. Sulle proprietà e sulla morfologia del film anodico possono influire la composizione

chimica dei materiali utilizzati, la grandezza, la forma e la distribuzione delle loro particelle, l'area superficiale specifica, densità, ecc. Basandosi sulle esperienze precedenti si è deciso di preparare gli anodi secondo lo schema presentato in Figura 30.

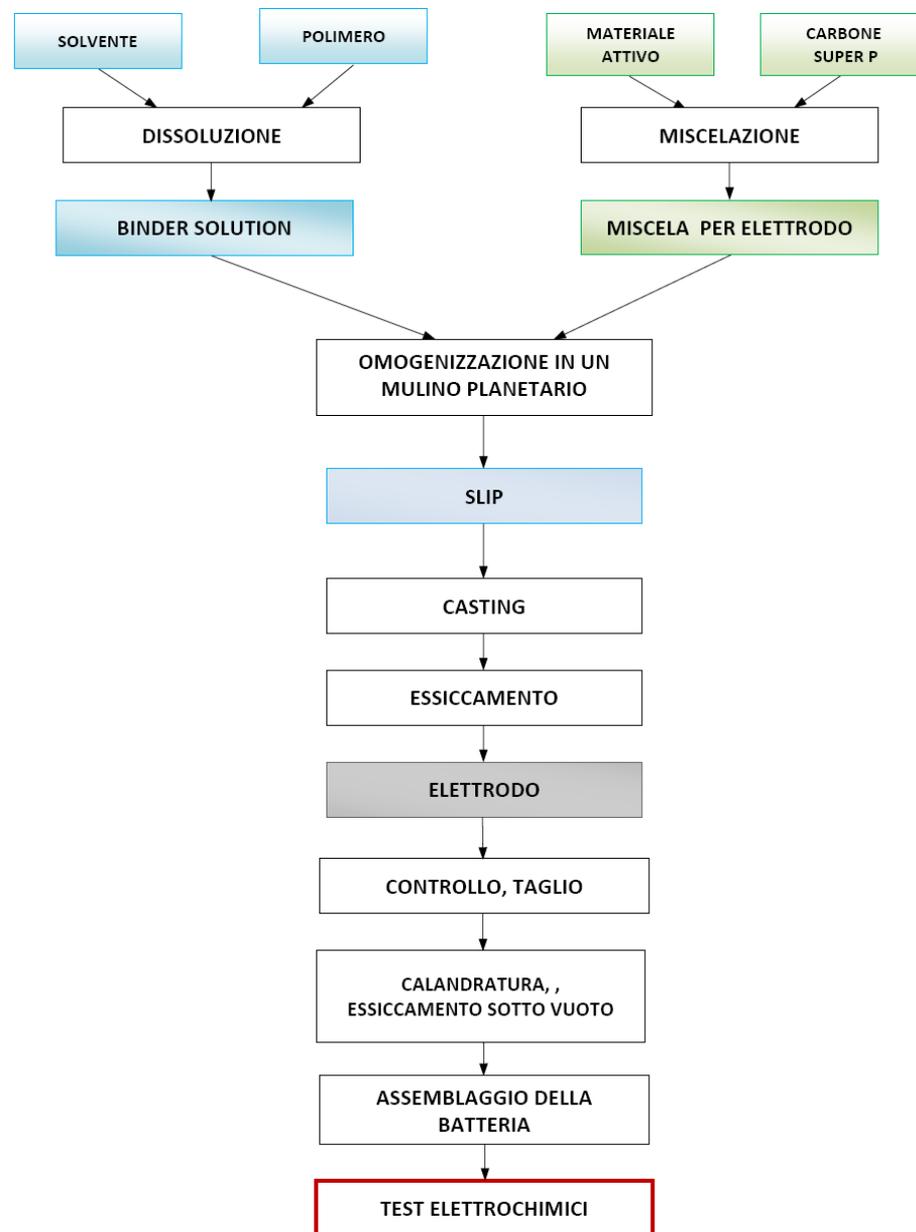


Figura 30. Schema del processo di preparazione degli elettrodi

In Figura 31 sono mostrate le immagini di alcuni dei campioni prodotti.

Per ottimizzare la procedura e i parametri operativi dell'intero processo di preparazione sono state effettuate diverse prove. Successivamente sono stati preparati alcuni catodi e anodi, di dimensioni circa 5,5 x 20 cm, sui quali sono state eseguite analisi al microscopio elettronico per valutare l'aspetto morfologico. Le analisi sono state condotte osservando i campioni sia in sezione di taglio che in superficie. Nella Figura 32 si riporta un esempio della documentazione fotografica.

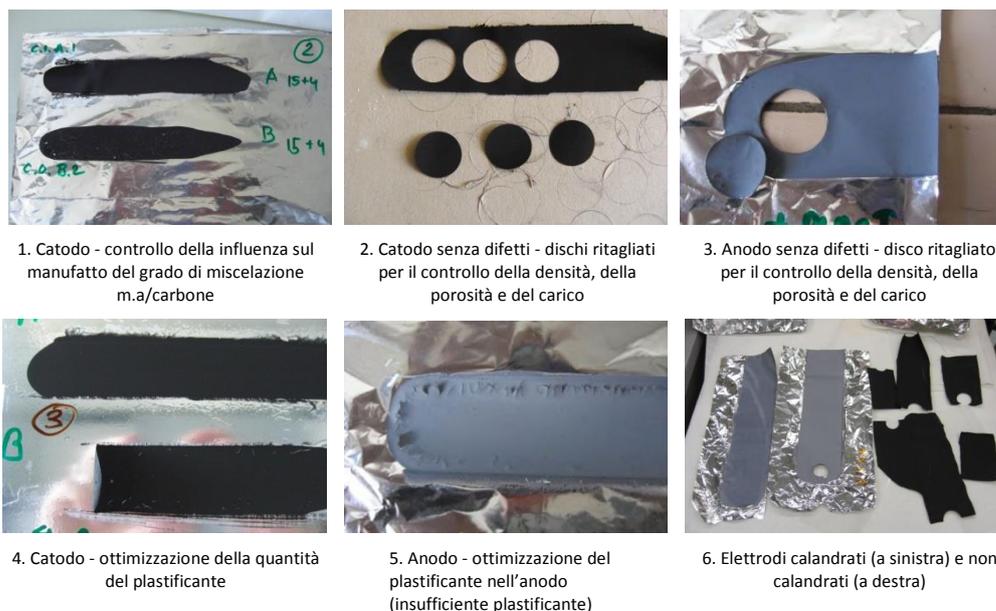


Figura 31. Ottimizzazione degli elettrodi preparati nei laboratori ENEA

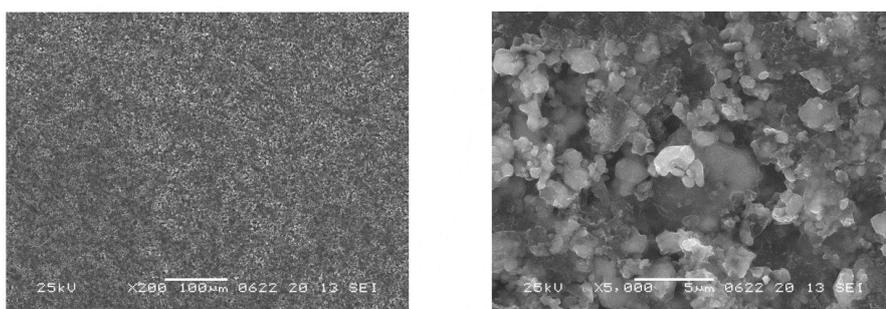


Figura 32. Superficie del catodo non calandrato a diverso ingrandimento (x200 e x5000)

Sono stati poi effettuati dei test elettrochimici sulle stese catodiche ed anodiche. Dai nastri sono stati quindi ritagliati, mediante l'apposita fustella, i dischi di diametro di 12 cm che sono stati pesati per controllare la quantità del materiale attivo per cm^2 .

Gli elettrodi a base di materiale catodico sono stati usati come catodi in celle al litio in cui lo stesso elettrodo fungeva anche da riferimento. I materiali sono stati fatti ciclare a C/10 e a differenti rate pari a C/10, C/5, C/2, C, 3C e 5C. Le condizioni di fine carica erano 4,4 V vs. Li. La condizione di fine scarica era di 2,0 V vs. Li. Per i catodi, la Figura 33 (a sinistra) mostra i profili di tensione in funzione della capacità per l'elettrodo LiFePO_4 ciclato a C/10 tra 4,2 e 2,0 V. Il carico di materiale attivo era di 15,0 mg. Sulla destra è possibile osservare la capacità specifica e il coefficiente di carica. La tensione iniziale dell'elettrodo era 3,25 V. In carica la tensione dell'elettrodo aumentato a raggiungere un plateau a 3,48 V. Alla fine del primo ciclo l'elettrodo è stato in grado di caricare 160 mAh/g. In scarica la tensione ha raggiunto un plateau a 3,4 V per poi improvvisamente raggiungere la tensione di fine scarica. Il materiale era in grado di scaricare 160 mAh/g. I profili di tensione nei cicli successivi erano quasi sovrapposti tra loro.

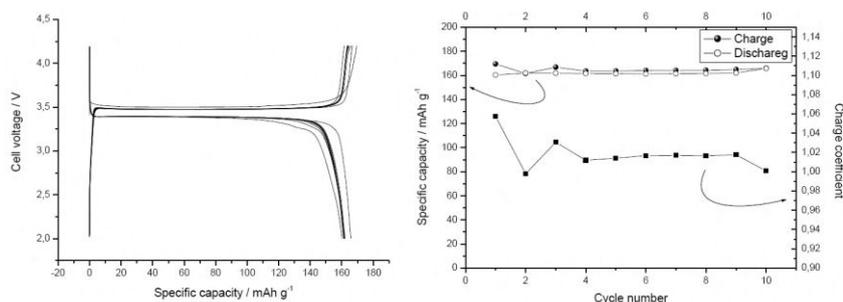


Figura 33. Primi dieci cicli di carica e scarica per la cella preparata con la stesa catodica n°2 a C/10

La Figura 34 mostra i risultati della caratterizzazione elettrochimica per una cella preparata con la stessa anodica a base di TiO_2 e ciclata tra 1,4 e 2,5 V a C/10 rate. Il carico di materiale attivo era 5,77 mg. Sulla sinistra è possibile osservare i profili di tensione in funzione della capacità dell'elettrodo mentre sulla destra la capacità specifica (riferita al peso del materiale attivo) ed il coefficiente di carica sono riportati in funzione del numero dei cicli. Al termine del primo ciclo di scarica l'elettrodo è stato in grado di intercalare 0,64 equivalenti di Li, raggiungendo una capacità specifica di circa 200 mAh/g, ad una tensione di circa 1,74 V. Durante il primo processo di carica la tensione ha lentamente raggiunto un plateau a 1,92 V. Questa tensione è mantenuta costante fino a quando è stata liberata una capacità pari a 100 mAh/g. A partire dal secondo ciclo, si osserva una progressiva diminuzione delle capacità in scarica ed in carica ed entrambe crollano ben presto a valori molto bassi. Già al quarto ciclo la capacità specifica era di soli 40 mAh/g. Il coefficiente di carica crolla dopo il primo ciclo portandosi ad un valore prossimo a 1,03-1,05.

Questo andamento è completamente differente da quelli osservati in precedenza.

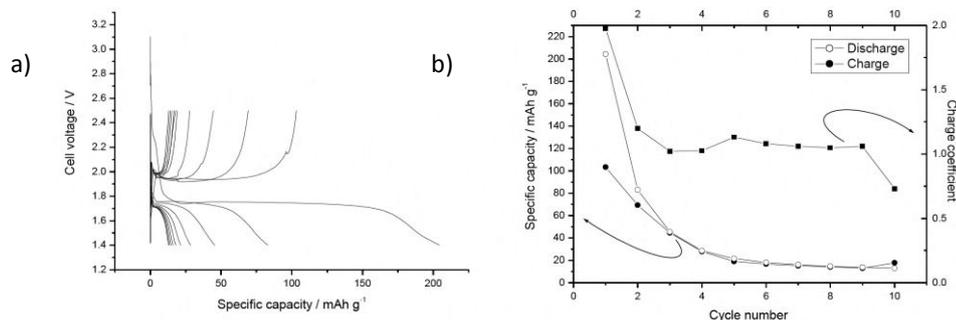


Figura 34. a) Profili di tensione per una cella preparata con la stessa anodica a base di TiO_2 e ciclata a C/10 rate per dieci cicli; b) Capacità specifica in carica e scarica per la cella descritta precedentemente. Nella figura è riportato anche il coefficiente di carica (asse a destra)

Nonostante le prestazioni elettrochimiche delle stese anodiche si siano dimostrate inadeguate, sono state realizzate delle batterie litio-ione di dimensioni significative. Si è deciso di operare in questo modo per valutare la tecnologia di preparazione delle batterie, pur sapendo che le prestazioni elettrochimiche delle stesse sarebbero state inficiate dalle prestazioni dell'anodo. Per la realizzazione della batteria è stata utilizzata una configurazione monopolare, con doppio portacorrente in rete di alluminio. La Figura 35a mostra gli elettrodi utilizzati per la preparazione della batteria. Si tratta di due elettrodi di dimensioni 60 cm^2 , con un carico pari a 7 mg/cm^2 di materiale attivo per il catodo e 6 mg/cm^2 per l'anodo. Così come evidenziato dalla caratterizzazione elettrochimica delle stese catodiche ed anodiche, è stata utilizzata una capacità specifica al primo ciclo pari a 170 mAh/g per il catodo e 200 mAh/g per l'anodo. La capacità di entrambi gli elettrodi era di circa $1,2 \text{ mAh/cm}^2$. La capacità totale della cella è stata di circa 72 mAh , inferiore alla previsione iniziale di centinaia di Ah, ma comunque significativa per la verifica dei processi di scale up e di progettazione ed ottimizzazione delle celle. Tra gli elettrodi è stato interposto un foglio di separatore e la singola cella è stata racchiusa all'interno di un contenitore plastico. La cella è stata quindi imbibita con una soluzione elettrolitica (LP30, Figura 35b) e saldata sotto vuoto in modo da operare una pressione tra gli elettrodi.

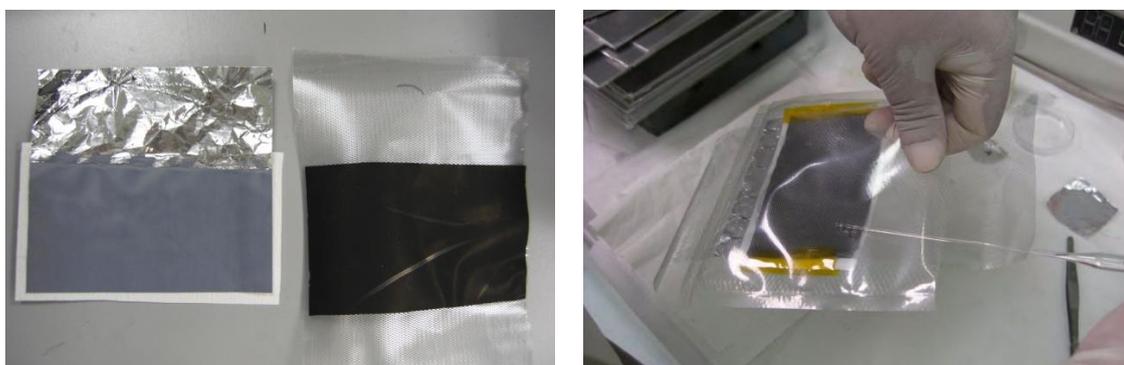


Figura 35. a) Immagini dell'elettrodo anodico (a sinistra in grigio) e di quello catodico (a destra colorato in nero) montati rispettivamente su un foglio e sui una rete di alluminio; b) Elettrodi accoppiati inseriti in un contenitore plastico

La Figura 36 mostra la cella nella sua versione finale. Sulla cella sono poi state effettuate le caratterizzazioni elettrochimiche; una analisi di spettroscopia di impedenza, effettuata prima di ciclare la cella e dopo la ciclazione galvanostatica. La ciclazione galvanostatica è stata effettuata ciclando la cella ad una corrente di carica/scarica pari a C/10.

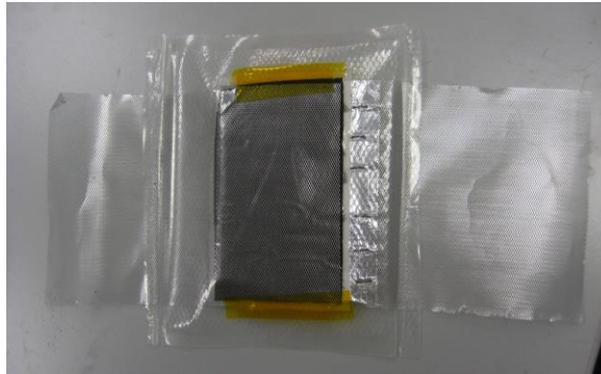


Figura 36. Immagine della batteria pronta per la caratterizzazione elettrochimica dopo aver saldato i quattro lati ed aver operato un leggero vuoto all'interno

La batteria è stata quindi collegata al ciclatore e sono stati effettuati dieci cicli di carica e scarica galvanostatici a corrente pari a 7,2 mA (corrispondente ad un rate di scarica di C/10). La Figura 37a riporta i profili di tensione dei differenti cicli.

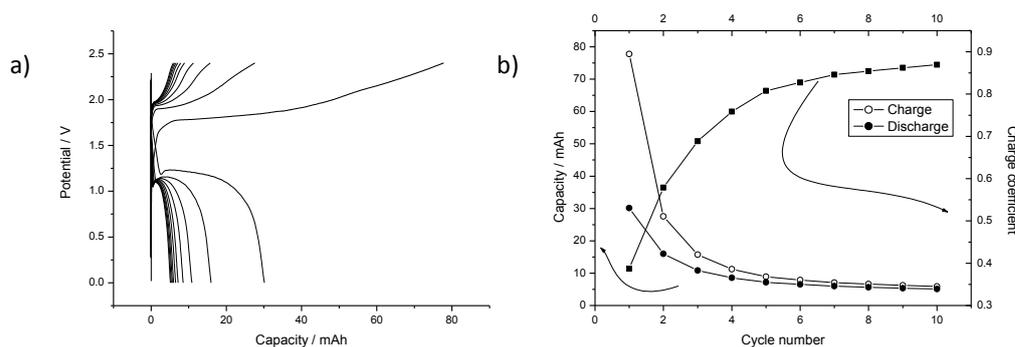


Figura 37. a) Profili di tensione per una batteria preparata con le stese anodiche e catodiche e ciclata a C/10 rate per dieci cicli; b) capacità specifica in carica e scarica per la cella descritta precedentemente. Nella figura è riportato anche il coefficiente di carica (asse a destra)

La carica è stata interrotta quando la tensione della batteria era superiore a 2,4 V. La batteria, durante il primo ciclo di carica, accumula tutta la capacità disponibile. La tensione della batteria si porta a circa 1.8 V e successivamente tende ad aumentare con il progredire della carica. Al termine, quando la tensione ha raggiunto 2,4 V la capacità accumulata dall'elettrodo era di 77 mAh. Nei cicli successivi la batteria carica solo una frazione della capacità scaricata al ciclo precedente. Come risultato la batteria perde rapidamente tutte le sue potenzialità ed in breve tempo la capacità è ridotta ad appena 10 mAh. Nella Figura 37a è riportata la capacità specifica in carica e scarica ed il coefficiente di carica. Si osserva che in nessun ciclo la batteria riesce a liberare tutta la capacità accumulata ed il coefficiente di carica non riesce che ad approssiarsi a 0,9. Il comportamento esibito dalla batteria riflette esattamente quello che era stato registrato per la stesa anodica ed è chiaro che le sue limitazioni sono da ricondurre al mal funzionamento dell' elemento anodico.

Redox Shuttle" per la protezione delle batterie al litio da sovraccarico

Gli aspetti di sicurezza nelle varie fasi di produzione, utilizzo e smaltimento/riciclo delle batterie al litio sono al centro di un'intensa attività di ricerca ed innovazione industriale, che finora ha portato alla realizzazione di sistemi automatici di gestione e controllo (BMS, Battery Management System), ormai indispensabili nell'uso di questi sistemi di accumulo, ed alla produzione di un'ampia gamma di norme indirizzate ai vari aspetti (produzione, trasporto, uso e riciclo).

Uno dei punti critici delle batterie litio-ione è rappresentato proprio dall'elettrolita che, in particolari condizioni, tende ad essere ossidato o ridotto, rendendo la cella litio-ione termodinamicamente instabile. La decomposizione dell'elettrolita, in particolare sulla grafite nel suo stato ridotto è un fenomeno comune durante il primo ciclo di carica delle celle litio-ione, fenomeno che diventa cineticamente irrilevante dopo la formazione di un film di passivazione sulla superficie dell'elettrodo che impedisce all'elettrolita di venire a contatto direttamente con la grafite. A differenza delle batterie piombo-acido o nichel-idruri metallici le batterie litio-ione non sono dotate di un meccanismo interno che le protegge dal sovraccarico e dai danni ad esso conseguenti. La sovraccarica di una batteria può avvenire in vari modi come, ad esempio, attraverso il passaggio di una carica superiore alla capacità della batteria o in seguito ad una carica veloce della batteria, senza che però si superi il limite di stabilità di uno dei componenti.

Le conseguenze del sovraccarico vanno dalla diminuzione della capacità di scarica e/o riduzione della vita della batteria al surriscaldamento, anche accompagnato da eventi catastrofici quali la possibilità di generazione di incendi e/o di esplosioni. Il potenziale di pericolosità aumenta all'aumentare delle dimensioni della batteria: in passato si sono verificati diversi incidenti con batterie per cellulari o per computer portatili che contenendo il solvente, il separatore e l'elettrodo negativo altamente infiammabili, si sono incendiati in seguito a malfunzionamenti dovuti in generale a sovraccariche. Queste batterie, che hanno un contenuto energetico relativamente piccolo, sono protette sia da sistemi elettronici, che limitano il potenziale applicato durante la carica, sia da sistemi fisici, che rendono permanentemente resistiva una cella sovraccarica ad esempio scollegando gli elettrodi in caso di aumento della pressione interna, causato dalla decomposizione dell'elettrolita o degli additivi aggiunti all'elettrolita in piccole concentrazioni.

Si è quindi deciso di approfondire i problemi legati alla sicurezza in uso delle batterie al litio, con un'attività di ricerca volta a studiare accumulatori al litio dotati di sicurezza intrinseca, tale da rendere sicuro l'accumulatore nei confronti di sovraccariche accidentali o dovute ad esempio a cortocircuiti interni [rapporto RdS/2013/241]. Tale attività è stata portata avanti studiando nuove formulazioni di elettrolita contenenti additivi in grado di agire come "shuttle" limitando la tensione di cella durante le sovraccariche. Questi additivi sono passivi o attivi a seconda che prendano parte o meno al processo elettrochimico.

Sistemi per la protezione da sovraccarico e principi operativi di "shuttle redox"

Attualmente i sistemi di protezione da sovraccarico disponibili prevedono un sistema di regolazione esterno della tensione di cella oppure l'uso di additivi che funzionano da agenti di inattivazione o che servano da shuttle di ossidoriduzione.

La tecnologia dominante allo stato attuale per le batterie litio-ione è il controllo esterno della tensione di cella, con questo sistema la tensione di ogni singola cella è costantemente controllata: laddove la tensione di cella fissata venisse superata, il circuito esterno verrebbe attivato e la corrente di carica fluirebbe attraverso di esso senza attraversare la cella litio-ione. Gli svantaggi di questo sistema di protezione sono l'aumento della complessità delle batterie legato al sistema di monitoraggio e controllo esterno e il conseguente incremento del peso e del volume e, quindi, del costo della batteria.

Un meccanismo di protezione alternativo prevede l'uso di agenti disattivanti come il 3-tiofenilpropano, il bi-fenile e il 3-clorotiofene e il furano. Poiché solo una piccolissima quantità di agente disattivante è aggiunta all'elettrolita l'incremento del peso della batteria in questo caso è trascurabile. La protezione della batteria si ottiene o attraverso la polimerizzazione dell'agente disattivante o tramite una reazione elettrochimica che trasforma l'agente disattivante in un gas. Nel primo caso il polimero formatosi andrà a ricoprire l'elettrodo bloccando il percorso degli ioni di litio, ed eventualmente aprendo il circuito della cella. Nel secondo caso il gas generato aumenta notevolmente la pressione interna della cella fino ad attivare lo sfiato ed aprire il circuito disattivando definitivamente la cella. Il principale svantaggio di tale sistema di protezione è che in entrambi i casi si ha la disattivazione permanente della cella in cui si è verificato il sovraccarico con conseguente inutilizzo di tutta la batteria.

Un altro modo per proteggere la batteria da sovraccarico prevede l'utilizzo di shuttle di ossidoriduzione. Lo shuttle di ossidoriduzione è un additivo dell'elettrolita che può essere reversibilmente ossidato e ridotto ad un potenziale caratteristico e tale da fornire una protezione interna delle batterie litio-ione senza incrementare la complessità e il peso del circuito di controllo o disattivare permanentemente la cella in caso di sovraccarico. La molecola di shuttle (S), ad un determinato potenziale, può essere ossidata sull'elettrodo positivo a radicale cationico (S^+), quindi, attraverso l'elettrolita, raggiunge l'elettrodo negativo dove viene ridotta alla forma originaria (S), a questo punto la molecola di shuttle diffonde nuovamente attraverso l'elettrolita per ritornare all'elettrodo positivo dove si ripete il ciclo di ossidoriduzione appena descritto. In caso di sovraccarico la tensione di cella aumenta attivando l'ossidoriduzione dello shuttle grazie al quale la carica è trasportata al circuito esterno attraverso la cella litio-ione

senza per questo forzare il processo di intercalazione/deintercalazione del litio negli elettrodi. È facilmente intuibile che gli shuttle di ossidoriduzione risultino promettenti per applicazioni ad alta energia e alta potenza.

Lo shuttle è un additivo che viene opportunamente disciolto nell'elettrolita e resta solo uno spettatore del processo di ossidoriduzione fino a quando non viene superato il potenziale di sicurezza della cella, a quel punto viene ossidato in una specie ancora solubile nell'elettrolita (spesso un radicale cationico), e diffonde attraverso l'elettrolita raggiungendo l'elettrodo negativo dove viene ridotto nella sua forma originaria, effettuando così il trasporto di elettroni attraverso la cella. Il vantaggio degli shuttle di ossidoriduzione risiede nel fatto che le loro molecole sono in continuo movimento tra gli elettrodi: in tal modo possono trasportare una grande quantità di carica attraverso la cella in un tempo breve.

I requisiti per uno shuttle di ossidoriduzione efficace, oltre ovviamente alla facilità della reazione di trasferimento di elettroni che è alla base del suo funzionamento, sono la stabilità (non reattività) di entrambe le sue forme, ossidata e ridotta, nei confronti di tutti i componenti con cui può venire in contatto, la solubilità di entrambe le forme nell'elettrolita nell'intero intervallo di temperatura a cui la cella lavora e all'eventuale aumento locale di concentrazione rispetto alla concentrazione iniziale del bulk, e una buona mobilità all'interno dell'elettrolita. Per tali motivi uno shuttle ideale dovrebbe avere basso peso equivalente, bassa volatilità e tossicità. Inoltre, per un suo uso in grande scala, deve essere anche poco costoso.

Shuttle di ossidoriduzione, prestazioni e potenziali sviluppi

Le molecole utilizzabili come shuttle di ossidoriduzione sono suddivisibili in tre gruppi: composti aromatici, composti non aromatici e polimeri elettro-attivi. La ricerca di potenziali candidati utilizzabili come redox shuttle è stata condotta nella scorsa decade essenzialmente su base empirica (trial and error), finché recentemente è stato sviluppato un software di meccanica quantistica che ne ha accelerato la selezione (screening).

Tra composti aromatici studiati come potenziali shuttle di ossidoriduzione per la protezione da sovraccarica delle batterie al litio ad alta tensione si annoverano i metalloceni, i tetraciano-etileni, la tetrametil-fenilen-diammina, derivati della di-idro-fenazina con il gruppo 2-idrossi-propile o etile su entrambi gli atomi di azoto, ed una serie di sali metallici di molecole aromatiche sostituite o di composti eterociclici. Alcuni complessi di metalli di Fe, Ru, Ir o Ce con la 1,10-fenantrolina o con la 2.2-bipiridina hanno mostrato potenziali di ossidoriduzione reversibile a circa 4,0 V rispetto alla coppia Li/Li⁺. Purtroppo il loro uso come shuttle di ossidoriduzione è limitato a causa della loro bassa solubilità e mobilità nei solventi usati nelle batterie litio-ione. Molti studi si sono concentrati sui composti della famiglia dell'anisolo, a causa della loro alta solubilità e del loro relativamente alto potenziale di ossidoriduzione.

Oltre ai composti aromatici ci sono quelli non aromatici studiati come shuttle di ossidoriduzione che presentano il vantaggio di poterli trovare come sali di litio e quindi presentare una solubilità nei solventi, comunemente impiegati nella tecnologia litio-ione per solubilizzare l'elettrolita, molto maggiore rispetto a quella dei composti aromatici.

Inoltre recentemente è stato introdotto un nuovo approccio nella ricerca di meccanismi reversibili di sovraccarica, nel quale si sfrutta lo stesso agente sia come elettrolita sia come shuttle di ossidoriduzione: è stato dimostrato che i cluster di sali di perfluoro-borano debolmente coordinati, per esempio litio fluoro-dodecaborano (Li₂B₁₂F_xH_{12-x}), non solo funzionano come elettrolita ma servono anche come shuttle di ossidoriduzione. L'anione (B₁₂F_xH_{12-x})²⁻ può essere facilmente ossidato in maniera reversibile ad un potenziale di circa 4,5 V a formare il corrispondente mono anione (B₁₂F_xH_{12-x})⁻. Occorre notare che il potenziale di ossidoriduzione osservato è il più alto tra i potenziali necessari ad ossidare le molecole usate come shuttle senza che avvenga la loro decomposizione. E' inoltre anche più elevato del normale potenziale di lavoro di molti catodi utilizzati in batterie al litio ad elevata energia e, per tale motivo potrebbe essere adatto all'impiego con catodi basati sul LiCO₂, LiMn₂O e LiMn₂O₄. È stato dimostrato che una cella grafite/LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05} O₂ contenente questo sale mostra una protezione da sovraccarica a 1C per 100 ore senza visibili diminuzioni nella capacità di scarica. La ricerca è attualmente concentrata su additivi stabili per applicazioni ad alti potenziali. Molecole come l'1,4-di-t-butyl-2,5-bis-2,2,2-trifluoroetossi benzene hanno mostrato caratteristiche simili a quelle esibite dal fluoro-dodecaborano lavorando da shuttle stabili con un potenziale di ossidoriduzione di 4,25 V e fornendo una protezione da sovraccarico in celle litio-ione che lavorano ad alta densità di energia.

Infine i polimeri elettro-attivi rappresentano una classe di polimeri in grado di svolgere il ruolo di shuttle di ossidoriduzione. La loro peculiarità consiste nel fatto che ciascuna unità monomerica è in grado di essere ossidata e ridotta in modo reversibile. Per la protezione da sovraccarico delle batterie litio-ione sono considerati come shuttle i polimeri elettro-attivi con potenziale di ossidoriduzione leggermente superiore a quello dell'elettrodo positivo della cella. Quando la batteria è sovraccaricata il polimero elettro-attivo cede elettroni all'elettrodo positivo formando "buche", cariche positive, che possono propagarsi dall'elettrodo positivo a quello negativo,

trasportando con questo meccanismo l'eccesso di carica attraverso la batteria senza causare sovraccariche. Il vantaggio dei polimeri elettro-attivi è che possono essere preparati in forma porosa e sostituire il separatore ammortizzando in parte il loro costo. Il difetto maggiore è che sono anche esposti a materiali a bassi potenziali come, ad esempio la grafite litiata il cui potenziale può abbassarsi a circa 0,1 V.

Parametri fondamentali per la scelta dello shuttle di ossidoriduzione sono i coefficienti di diffusione delle forme ossidata e ridotta, la concentrazione iniziale dell'additivo, il numero di elettroni trasportati e lo spessore del separatore. I coefficienti di diffusione dipendono, oltre che dalla massa della specie diffondente, anche dalla sua area di sezione, dalla viscosità dell'elettrolita (che può variare di un fattore 20 e oltre a seconda del solvente utilizzato) e dalla temperatura. La mobilità di una specie carica può essere rallentata da sue interazioni con altri componenti dell'elettrolita attraverso accoppiamento ionico o solvatazione. Misure di coefficiente di diffusione della specie nella forma ridotta possono essere effettuate usando metodi elettrochimici e spettro elettrochimici. Il metodo più semplice è la voltammetria lineare con microelettrodo a disco.

Gli shuttle di ossidoriduzione sono attualmente presenti in alcune batterie ricaricabili usate per alimentare dispositivi di elettronica di consumo, ma non ancora utilizzati in sistemi di grande taglia. Il loro scopo è quello di eliminare piccole correnti che potrebbero verificarsi durante le fluttuazioni di carica, mantenendo così costante il potenziale durante la carica stessa. Molti problemi importanti devono essere superati prima che gli shuttle siano in grado di trasportare correnti di sovraccarica significative. Inoltre gli shuttle comunemente noti hanno una velocità di diffusione troppo bassa e di conseguenza devono essere presenti in grandi concentrazioni ($\geq 0,5 \text{ molL}^{-1}$), spostando parte dell'elettrolita, modificandone le proprietà fisiche ed elettrochimiche ed aumentando la possibilità di precipitazioni di sali del radicale cationico, specialmente alle basse temperature dove la protezione da sovraccarica è critica. L'assorbimento degli shuttle sul carbon black, un materiale ad elevata estensione superficiale ed usato come additivo conduttore negli elettrodi, riduce ulteriormente le prestazioni degli shuttle. A causa di questi fenomeni, i percorsi di diffusione sono ristretti e contribuiscono all'accumularsi di shuttle nella forma ossidata che risultano rallentati o addirittura immobilizzati a causa della non omogenea distribuzione della corrente all'interno della cella.

b. Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

Le attività di questo obiettivo sono state incentrate sulla verifica delle modalità di adattamento tecnologico e funzionale delle batterie al litio alle applicazioni nelle reti elettriche, tenendo anche conto dello stato della tecnologia, degli aspetti economici (costi attuali) e di sicurezza che ancora ne limitano l'uso diffuso in vari punti della rete elettrica.

Le attività si sono sviluppate quindi secondo alcune ben definite linee di studio:

- L'adattamento ed ottimizzazione del funzionamento di moduli al litio, inizialmente concepiti per uso automobilistico, mantenendo i vantaggi tipici delle batterie al litio rispetto a quelle al piombo in termini di capacità di accettazione di ricariche rapide e di maggiore vita utile. Pertanto sono state eseguite prove al banco finalizzate a verificare le prestazioni dei moduli nel loro complesso, cioè come insieme di celle, elettronica di controllo (BMS), meccanica (involucro), thermal management; i moduli sono stati sottoposti a cicli di carica e scarica a diverse temperature, mediante ciclatori e camere climatiche. Questa serie di prove ha consentito la valutazione delle prestazioni dei moduli in condizioni il più possibile simili a quelle d'esercizio in impianti per applicazioni stazionarie. Gli aspetti termici sono stati oggetti di specifiche analisi per avviare una modellazione ed un controllo più accurato in condizioni di funzionamento "estremo".
- L'acquisizione di dati di effettiva funzionalità e di cicli di funzionamento di sistemi di accumulo commerciali mediante lo studio e la progettazione preliminare dell'introduzione di un sistema di accumulo stazionario (batterie al litio o supercondensatori) in una metropolitana di superficie, tipo quella in funzione nella città di Bergamo, effettuata con tram. Sono stati acquisiti i profili di potenza ed energia richiesti alla rete elettrica di alimentazione della metropolitana per determinare il dimensionamento e la localizzazione di un eventuale sistema di accumulo in modo da massimizzare il vantaggio ottenibile.
- Il completamento della verifica sperimentale in condizioni reali di esercizio dei dispositivi elettronici di controllo ed interfaccia verso la rete elettrica sviluppati nel precedente anno di attività con l'utilizzazione di una batteria al litio appositamente acquisita, sia nel caso dell'impianto già realizzato presso l'Università di Palermo, che nel completamento della sperimentazione sulla "casa attiva".
- Lo svolgimento delle attività di valutazione sperimentale della "second life" delle batterie al litio, per poterne analizzare i vantaggi economici e rendere ancora più conveniente l'uso di tali sistemi.

- Infine le attività sperimentali sulle batterie al litio sono sempre state supportate dall'analisi degli aspetti di sicurezza sulla base della normativa esistente ed in preparazione.

Il lavoro è stato svolto in ENEA e presso le università di Palermo e Pisa. L'Università di Palermo (Dipartimento Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici, DEIM) ha completato l'integrazione in un impianto sperimentale a fonti rinnovabili (eoliche e fotovoltaiche) di un sistema di accumulo al litio ed il perfezionamento dell'intero sistema (logico e fisico) di controllo dell'apparato con l'esecuzione di una campagna sperimentale.

L'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione) ha collaborato con l'ENEA per ottimizzare l'elettronica di gestione e controllo di moduli batterie, basate preferenzialmente anche se non esclusivamente su celle con chimica LiFePO_4 ; l'ENEA ha svolto una campagna sperimentale dell'intero sistema di accumulo comprensivo del BMS.

L'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, DESTEC) ha completato la verifica sperimentale e l'analisi delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica (casa attiva), ed inoltre, in collaborazione con ricercatori ENEA, ha svolto uno studio per definire le sollecitazioni a cui un sistema di accumulo elettrochimico, di tipo gestionale, è sottoposto durante il suo funzionamento in una sottostazione di alimentazione di una rete tranviaria e, dopo simulazioni con curve di lavoro sperimentali della struttura elettrica e del servizio, sono stati sviluppati una logica di gestione dello stato di carica degli accumulatori e un criterio di dimensionamento della capacità energetica di accumulo.

Le attività dell'ENEA nello specifico hanno riguardato:

- attività di caratterizzazione e prova di moduli al litio e relativa elettronica di gestione con l'avvio dello studio degli aspetti di gestione termica; l'ottimizzazione del sistema di accumulo al litio, acquisito nella precedente annualità, per l'impianto sperimentale dell'Università di Palermo con la soluzione di problemi di guasti ed erronei funzionamenti e la messa a punto e la verifica della campagna sperimentale;
- realizzazione e validazione sperimentale del BMS per moduli al litio in collaborazione con l'Università di Pisa (ingegneria dell'Informazione);
- studio e analisi dell'applicabilità dei sistemi di accumulo in reti tranviarie in collaborazione con l'Università di Pisa;
- attività relative allo studio sperimentale della "second life" delle batterie al litio; l'attività è stata limitata alla verifica della compatibilità dei profili di prova con la strumentazione ENEA ed ad una lunga serie di contatti per ottenere le celle dichiarate "esauste" nell'uso in veicoli elettrici, ma con una capacità residua compresa tra il 60 e l'80%. Le aziende contattate, anche più volte, sono state: NEC, IVECO-Altra, Centro Ricerche FIAT, Toshiba, Piaggio, Nissan, FAAM e piccole aziende produttrici di veicoli elettrici. Effettiva indisponibilità e problemi di riservatezza purtroppo hanno impedito di ottenere celle adeguate per la sperimentazione prevista. Soltanto la Piaggio ha fornito delle celle al litio che purtroppo non sono sufficientemente degradate, e FIB (ex-FAAM) ha dato la disponibilità a fornire celle esauste delle caratteristiche richieste.

Test di caratterizzazione e duty cycle per applicazioni stazionarie di moduli standard di batterie al litio

L'ENEA ha svolto una completa campagna sperimentale per verificare la possibilità d'impiego di moduli integrati al litio, precedentemente sviluppati per veicoli elettrici, in applicazioni stazionarie, specializzando le prove di caratterizzazione con l'applicazione di profili di lavoro tipici di usi stazionari.

Parallelamente all'esecuzione delle prove, è stata eseguita un'attività di progettazione per ottimizzare la scheda elettronica di gestione e controllo, al fine di adattarla meglio all'impiego in applicazioni stazionarie. Tale attività è stata svolta dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa [rapporto RdS/2013/246] su specifica ENEA, che successivamente si è occupata della realizzazione ed approvvigionamento della scheda elettronica nuova versione, nonché delle conseguenti modifiche meccaniche sull'involucro, giungendo, in conclusione, alla nuova release dei moduli batterie. È stato realizzato un esemplare per ciascuna tipologia di modulo.

Inoltre è stata introdotta la riconfigurabilità dinamica come fattore di specializzazione del BMS per applicazioni stazionarie, ed è stato studiato un nuovo posizionamento della scheda elettronica che ha consentito di ottenere una notevole riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli, senza alterarne l'altezza in maniera significativa. Le conseguenti modifiche sulla meccanica hanno condotto ad un restyling dei moduli: i nuovi esemplari prodotti, uno per ciascuna tipologia di modulo, in risposta ai deliverable del Piano Annuale di Realizzazione 2012, costituiscono

dei prodotti disponibili per una successiva fase di ingegnerizzazione, da condurre con eventuali partner industriali interessati.

Maggiori dettagli sull'attività svolta da ENEA sono riportati nel rapporto RdS/2013/247.

I moduli standard

Le prove sono state eseguite sui moduli standard realizzati nella precedente annualità. Ciascun modulo è costituito da 4 celle al litio (con catodo in litio ferro fosfato, LiFePO_4) da 3,2 V nominali, collegate in serie, ottenendo una tensione totale pari a 12,8 V nominali. Sono state prodotte tre tipologie di modulo: piccola, media e grande taglia. I moduli sono equipaggiati con celle rispettivamente da 30, 60 e 100 Ah. Ciascun modulo è corredato di una scheda elettronica di gestione e controllo con bilanciamento attivo e di un sistema di raffreddamento costituito da tre ventole da $34,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ $75,5 \text{ Pa}$ @ 7.000 giri/min ciascuna. La scheda elettronica BMS è stata progettata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa (su specifica ENEA) e realizzata dall'ENEA nella precedente annualità. La Figura 38 mostra l'interno dei moduli al litio e la Tabella 4 ne riassume le principali caratteristiche elettriche.



Figura 38. Vista interna ed esterna dei moduli al litio assemblati

Tabella 4. Principali caratteristiche elettriche dei moduli

Grandezza		Piccola taglia	Media taglia	Grande taglia
Tensione nominale singola cella [V]		3,2	3,2	3,2
Numero di celle in serie		4	4	4
Capacità nominale [Ah]		30	60	100
Temperatura di esercizio (scarica) [°C]		-20 ÷ +65	-20 ÷ +65	-20 ÷ +65
Temperatura di esercizio (carica) [°C]		0 ÷ +45	0 ÷ +45	0 ÷ +45
Scarica @ +23°C	Max corrente continuativa [A]	90	180	300
	Corrente di picco @ 60 sec [A]	150	300	500
	Tensione di cut-off (valore di cella) [V]	2,5	2,5	2,5
Carica @ +23°C	Metodo di carica	CC/CV	CC/CV	CC/CV
	Max corrente di carica [A]	30	60	100
	Tensione max consigliata (valore di cella) [V]	3,65	3,65	3,65
	Tensione di cut-off (valore di cella) [V]	3,85	3,85	3,85

Prove sui moduli

La verifica dell'idoneità all'impiego dei moduli è stata condotta sottoponendoli a prove di caratterizzazione e prove specialistiche per applicazioni stazionarie, finalizzate a verificare le prestazioni dei moduli nel loro complesso, cioè come insieme di celle, scheda elettronica BMS, meccanica e thermal management, in condizioni riproducibili quelle d'esercizio. Le prove sono state eseguite presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, mediante l'impiego di ciclatori e camere climatiche (Figura 39).

Durante l'esecuzione delle prove lo stato delle singole celle è stato costantemente monitorato dal sistema



Figura 39. Camera climatica (sinistra) e ciclatore (destra)

elettronico di gestione e controllo, che interviene in caso di allarme facendo “aprire” un contattore che disconnette il modulo batterie dal ciclatore, interrompendo ogni fase di lavoro attiva dello stesso.

Le prove di caratterizzazione sono state condotte sottoponendo i moduli a cicli costituiti da una scarica a corrente costante di intensità pari a $3C^2$, seguita, dopo una pausa di $\frac{1}{2}$ ora, da una carica del tipo corrente costante/tensione costante con valore massimo di corrente pari ad $1C$, cioè sono state poste in successione una scarica ed una carica ai massimi livelli di corrente consentiti dal costruttore delle celle. La carica alla corrente massima consente, tra l’altro, di saggiare la capacità del modulo batterie di accettare cariche rapide. La Tabella 5 riporta la sequenza di prova.

Tabella 5. Sequenza prova di caratterizzazione

N° Fase	Descrizione della fase
1	Ciclo standard di preparazione
2	Acclimatazione alla temperatura di prova
3	Scarica completa a corrente costante 3C
4	Pausa $\frac{1}{2}$ h
5	Carica completa CC/CV, $I_{max} = 1C$

Prima della prova il modulo è stato sottoposto a un ciclo standard di preparazione e mantenuto a temperatura controllata per il tempo necessario al raggiungimento della temperatura di prova (acclimatazione). La scarica completa è stata ottenuta attraverso l’applicazione di una corrente costante di intensità $3C$ fino al raggiungimento della condizione di fine scarica, che si verifica quando la tensione di una cella raggiunge il valore minimo $2,5$ V, indicato dal costruttore delle celle oppure qualora sia raggiunta la tensione minima di modulo, 10 V, corrispondente al raggiungimento della tensione minima in tutte le celle. La durata della pausa è stata appositamente ridotta, al fine di esaltare lo stress termico.

La carica applicata è del tipo corrente costante - tensione costante, cioè composta da una fase di carica a corrente costante, con valore di corrente uguale al limite massimo per la corrente di carica continuativa, $1C$, fornito dal costruttore delle celle, fino al raggiungimento della tensione massima di modulo ed una fase di carica a tensione costante, pari al valore raggiunto nella fase precedente, in cui la corrente si riduce gradualmente con l’aumentare dello stato di carica del modulo, fino al valore minimo 1 A, ove la carica si può considerare completa. Il valore massimo della tensione è un compromesso tra il massimo valore della tensione di cella, $3,65$ V, indicato dal costruttore della cella stessa, e la tensione massima di modulo $14,6$ V, corrispondente al raggiungimento della tensione massima in tutte le celle. Nel caso in esame, è stato impostato il valore $14,5$ V.

Durante la prova sono state registrate la tensione e la temperatura delle singole celle, la tensione di batteria, la corrente, la temperatura ambiente e quella della scheda elettronica, con un tempo di campionamento pari a 10 s.

La prova è stata eseguita a diversi valori della temperatura di lavoro (23 °C, 30 °C e 40 °C). Particolare rilevanza è stata data alla prova a 40 °C, perché rappresentativa delle prestazioni dei moduli nelle condizioni più impegnative, in quanto alla scarica/carica ai massimi regimi consentiti dal costruttore delle celle abbina la temperatura 40 °C che, oltre ad essere comunemente citata negli standard relativi alle procedure di prova per batterie al litio, è anche una temperatura facilmente raggiungibile in estate all’interno delle tipiche strutture in cui sono alloggiati i sistemi d’accumulo per uso stazionario al verificarsi, ad esempio, di un guasto all’impianto di condizionamento termico del locale. Anche in queste condizioni, il sistema di raffreddamento ha consentito di portare a termine la prova senza incorrere nell’arresto del sistema da parte del BMS per protezione termica. La Figura 40 illustra

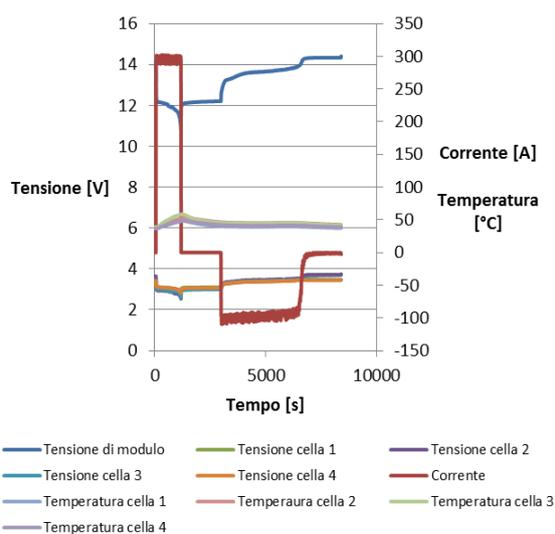


Figura 40. Ciclo di scarica 3C e carica 1C @ 40°C per il modulo batterie da 100 Ah

² Con la dicitura nC si intende un valore di corrente pari ad n volte il valore della capacità nominale C. Analogamente, con il termine C/n si intende un valore di corrente pari al valore della capacità nominale C diviso per n.

l'andamento dell'esperimento per il modulo da 100 Ah, che è risultato essere quello più sollecitato: il valore massimo di temperatura raggiunto è 58 °C, comunque inferiore al valore limite fornito dal costruttore delle celle, 65 °C.

Durante lo svolgimento della prova, la tensione e la temperatura delle celle costituenti il modulo si sono mantenute nei limiti di normale funzionamento. I valori di capacità risultano leggermente inferiori alla capacità nominale: ciò è corretto, a causa della normale riduzione del valore di capacità legata all'intensità della corrente di scarica. I valori del rendimento coulombico sono leggermente inferiori all'unità, quindi in linea con i valori usuali. I valori del rendimento energetico oscillano tra il 73 ed il 77%: si tenga presente che nella definizione canonica dei rendimenti si fa riferimento ad una scarica seguita da una pausa di durata opportuna e poi da una carica standard: per le batterie al litio, ottenendo valori tipici del rendimento energetico che sono qualche punto percentuale al di sopra del 90%. Nel caso in esame, il calcolo del rendimento è stato fatto con riferimento ad una scarica violenta, seguita da una pausa appositamente corta per accentuare la condizione di stress del modulo batterie e quindi da una carica violenta, eseguite, tra l'altro, su celle non più completamente nuove (in quanto si tratta delle celle approvvigionate e testate, sempre in condizioni severe, nei due anni precedenti). Si ritengono pertanto plausibili i valori di rendimento energetico ottenuti nelle prove.

Prove per applicazioni stazionarie

Nelle applicazioni stazionarie le batterie sono sottoposte a sequenze di scarica e carica di diversa intensità e durata, in funzione dell'applicazione cui sono rivolte. Escludendo il caso dei gruppi di continuità, i servizi per cui vengono utilizzate le batterie nelle applicazioni stazionarie si possono riassumere e suddividere in due categorie principali: power balancing e time shift.

Nel servizio di *power balancing*, il sistema di accumulo è utilizzato in abbinamento ad una fonte rinnovabile o un convertitore per livellare la curva di produzione e di carico. Nel caso dell'abbinamento ad una fonte rinnovabile, il sistema di accumulo compensa le fluttuazioni di potenza fornita dalla fonte rinnovabile. Nel caso dell'abbinamento ad un convertitore, il valore di potenza totale da fornire all'impianto utilizzatore viene suddiviso tra il convertitore stesso ed il sistema d'accumulo che, in questo tipo di applicazione, consente di limitare la potenza installata del convertitore e diminuire l'energia prelevata dalla rete, contribuendo alla riduzione delle emissioni di CO₂. A ciò si associa spesso anche un servizio di "power quality", ottenuto con l'ulteriore aggiunta di un banco di condensatori.

Nel servizio di *time shift*, il sistema di accumulo è utilizzato per immagazzinare energia in un certo periodo, quando è disponibile, per poi utilizzarla diverso tempo dopo, quando si ha una richiesta di potenza. La differenziazione temporale tra accumulo ed utilizzo, oltre che alla disponibilità dell'energia, può essere legata anche ai costi della stessa, che sono diversi nella varie fasce orarie della giornata e nei giorni della settimana. Il *time shift* risulta quindi utile nel tentativo di ottimizzare il fattore disponibilità/costi dell'energia. Dette prove sono state eseguite applicando le procedure di prova per la caratterizzazione di batterie al litio e supercondensatori in applicazioni stazionarie e veicolari (rapporto RdS/2013/243 e 244) elaborate dal Gruppo di lavoro CNR-ENEA-RSE promosso dal Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento delle attività relative alla Ricerca di Sistema Elettrico.

Il profilo di potenza utilizzato per la prova di *power balancing* è presentato in Figura 41 ed è utilizzato per la determinazione di alcuni parametri prestazionali delle batterie.

La Figura 42 riporta, a titolo di esempio, l'andamento tipico dei valori registrati durante l'applicazione del profilo di prova *power balancing* al modulo da 30 Ah, e dimostra la stabilità dei valori di tensione e temperatura delle celle e del modulo all'interno dell'intervallo di esercizio raccomandato. In particolare, durante l'applicazione del profilo di potenza la temperatura sale dal valore stabilito per la prova, 30°C, fino al valore massimo di 37°C: in queste condizioni, il sistema di ventilazione non interviene.

La determinazione dei parametri energetici relativi al singolo profilo, ha condotto ai risultati riportati in Tabella 6.

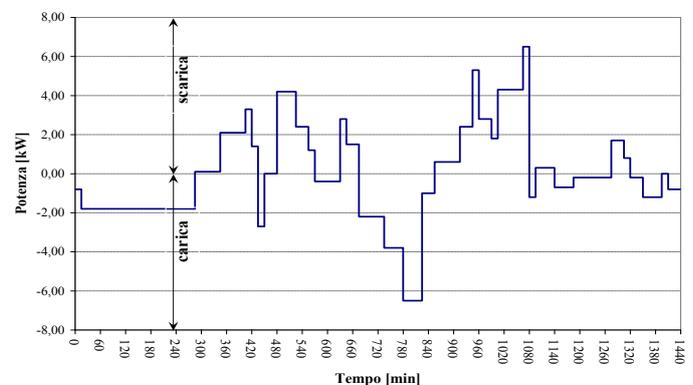


Figura 41. Profilo di carica/scarica per la prova di power balancing con batteria standard

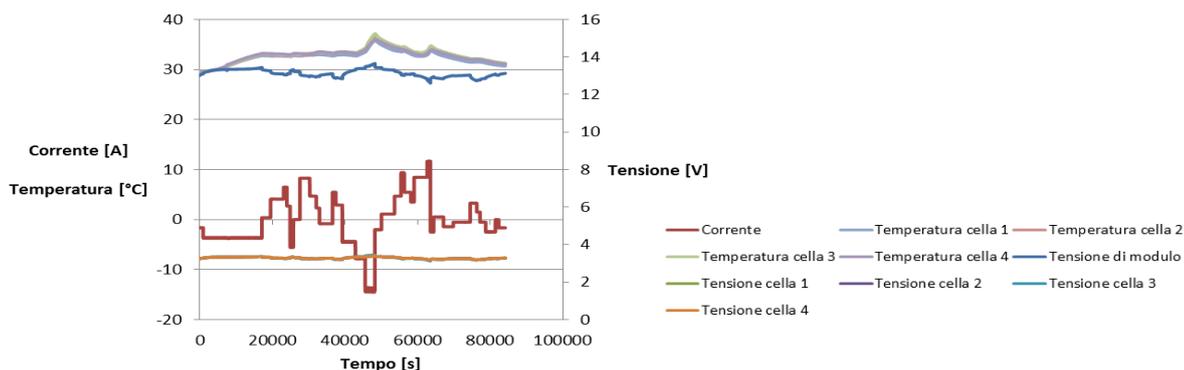


Figura 42. Prova di “power balancing” (modulo da 30 Ah)

Tabella 6. Capacità ed energia nel profilo “power balancing”.

Taglia modulo	Capacità scaricata [Ah]	Capacità caricata [Ah]	Rendimento coulombico	Energia scaricata [Wh]	Energia caricata [Wh]	Rendimento energetico
Piccola	43,41	44,09	0,98	564,30	589,87	0,95
Media	86,83	88,19	0,98	1128,60	1179,74	0,95
Grande	144,55	146,79	0,98	1869,39	1972,40	0,94

Per la prova di *time shift*, il profilo di potenza, illustrato in Figura 43, è costituito da una successione di gradini di carica e scarica a potenza costante, di diversa ampiezza. I valori di potenza indicati in figura sono validi per una batteria standard (batteria da 15 kWh alla potenza nominale). Per effettuare prove su batterie più piccole si dividono i valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l’energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova.

La prova è stata eseguita sottoponendo il modulo batterie all’applicazione del profilo di carica/scarica riportato in Figura 43, per ogni tipo di modulo sono state eseguite cinque ripetizioni del profilo. Durante la prova sono state registrate le tensioni e la temperatura delle singole celle, la tensione di batteria, la corrente e la temperatura

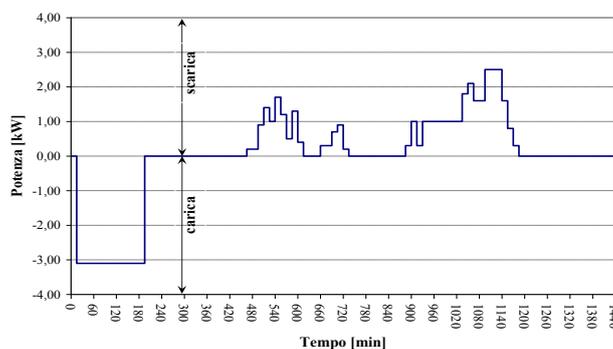


Figura 43. Profilo di carica/scarica per la prova di “time shift” con batteria standard

dell’ambiente di prova, con un tempo di campionamento pari a 60 s. L’attitudine della batteria a lavorare in tale applicazione viene valutata attraverso la rilevazione o il calcolo dei seguenti parametri: capacità, energia, rendimento coulombico, rendimento energetico. La Figura 44 presenta, a titolo esemplificativo, l’andamento tipico dei valori registrati durante l’applicazione del profilo di prova *time shift* al modulo da 60 Ah, e conferma, anche in questo caso, la non utilizzazione del sistema di ventilazione per effetto del limitato aumento di temperatura delle celle e del modulo, ben al di sotto del limite raccomandato: la temperatura sale dal valore programmato per la prova, 32 °C, fino al valore massimo di 35 °C.

La determinazione dei parametri energetici relativi ad una singola applicazione del profilo, ha condotto ai risultati riportati in Tabella 7.

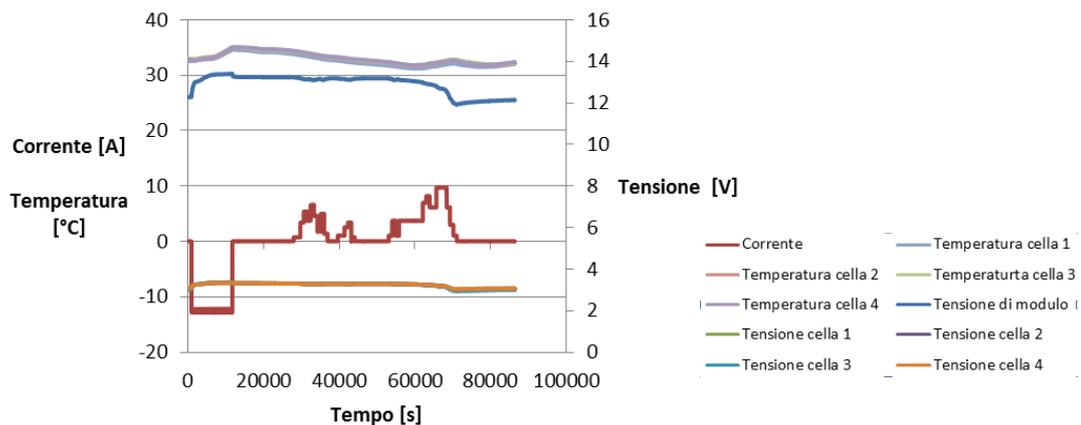


Figura 44. Prova di "time shift" (modulo da 60Ah)

Tabella 7. Capacità ed energia nel profilo "time shift"

Taglia modulo	Capacità scaricata [Ah]	Capacità caricata [Ah]	Rendimento coulombico	Energia scaricata [Wh]	Energia caricata [Wh]	Rendimento energetico
Piccola	18,46	18,49	0,99	238,76	245,67	0,97
Media	36,92	36,99	0,99	477,52	491,35	0,97
Grande	61,24	61,57	0,99	787,12	831,19	0,95

Ottimizzazione del sistema elettronico di gestione e controllo e riconfigurabilità dinamica

L'adattamento alle applicazioni stazionarie del sistema di accumulo ha richiesto diverse sostanziali modifiche di architettura dell'intero sistema. Nella configurazione adottata in precedenza, la scheda elettronica era disposta verticalmente, tra le batterie, come mostrato nella Figura 45. La soluzione preferita, per esigenza di riduzione degli spazi, risulta quella in cui la scheda elettronica porta a bordo i ventilatori e giace al di sopra delle celle, consentendo una riduzione delle dimensioni in pianta, senza comportare apprezzabili variazioni in altezza. Questa esigenza è fortemente vincolante in campo automobilistico, meno in quello stazionario, ove comunque è sempre importante, giacché anche in questo caso sussistono problemi di ingombro (ad esempio, nel caso di alloggiamento delle batterie all'interno di convertitori/compensatori).

La presenza sulla scheda elettronica dei fori per il passaggio dell'aria attraverso i ventilatori, ha determinato la necessità di ridisegnare il circuito, con una nuova disposizione dei componenti su una superficie minore rispetto alla soluzione precedente, anche tenendo conto del fatto che in questa situazione le dimensioni globali della scheda elettronica sono influenzate dalle dimensioni in pianta del modulo e dal passaggio dei cilindri terminali che portano all'esterno la tensione del modulo.

Inoltre è stata condotta un'attività, inizialmente non prevista, per una migliore ottimizzazione della scheda elettronica BMS per un impiego più mirato alle applicazioni in reti elettriche: la *riconfigurabilità dinamica*. Nel caso di batterie di grande taglia (fino ai MW di potenza), composti dalla serie di più stringhe di moduli, la riconfigurazione dinamica consente l'esclusione di una sezione del sistema (che si è reso inutilizzabile ad es. per causa guasti o manutenzione) compatibilmente con la finestra della tensione di lavoro accettabile dall'utenza, senza interruzione del servizio. Come primo step, ci si è limitati al caso di applicazioni stazionarie a bassa tensione, 400 V, con prospettiva di estendere il campo applicativo ai sistemi in media tensione, sino al kV.

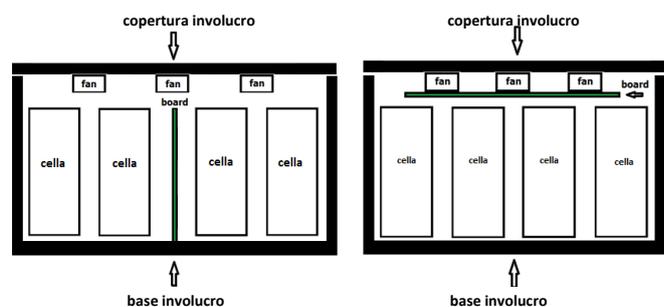


Figura 45. Posizione della scheda elettronica nella vecchia e nuova configurazione

L'attività di aggiornamento e modifica del BMS, dopo una definizione congiunta delle specifiche, è stata effettuata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, che ha utilizzato parte dei risultati sperimentali per la progettazione esecutiva e sviluppo degli algoritmi (rapporto RdS/2013/246).

L'ENEA si è occupata della produzione dei nuovi disegni tecnici, e, successivamente, della realizzazione di alcuni esemplari dei nuovi contenitori: la fornitura degli involucri (completi dei ventilatori, dei collegamenti interni di potenza e degli elementi di fissaggio) è stata affidata ad una ditta esterna. Le Figure 46 e 47 illustrano i risultati raggiunti in termini di ottimizzazione della configurazione geometrica interna e nuovo posizionamento della scheda elettronica BMS.



Figura 46. Vista interna dei nuovi moduli batterie: 30 Ah e 60 Ah (sinistra), 100 Ah (destra)



Figura 47. Nuova posizione della scheda elettronica BMS

Conclusioni

I risultati delle prove di caratterizzazione hanno dimostrato la fattibilità d'impiego dei moduli batterie in applicazioni stazionarie. Le verifiche sono state eseguite su tre moduli realizzati specificatamente di tre taglie diverse (30, 60 e 100 Ah). L'introduzione della riconfigurabilità dinamica come uno dei fattori di ottimizzazione del BMS, ha ancor più specializzato i moduli per questo tipo di applicazioni. Lo studio in tal senso, per ora limitato ad applicazioni in bassa tensione, 400V, può proseguire per applicazioni di media tensione, fino ad 1 kV. Oltre alla riconfigurabilità dinamica, è stato effettuato il nuovo posizionamento della scheda elettronica, che ha consentito una notevole riduzione delle dimensioni in pianta dei moduli, senza alterarne in maniera significativa l'altezza: quest'ultimo aspetto, anche se meno vincolante rispetto alle applicazioni veicolari, è comunque utile anche nelle applicazioni stazionarie. Il tutto si unisce poi all'esperienza d'uso dei moduli della versione precedente, che ha suggerito l'adozione di altri piccoli miglioramenti, per cui la nuova release dei moduli che ne è scaturita ha portato a dei moduli batterie disponibili per una successiva fase di ingegnerizzazione, da condurre con eventuali Industrie interessate.

Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie

L'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione) ha svolto le attività concordate con l'ENEA per ottimizzare l'elettronica di gestione e controllo di moduli batterie, basate preferenzialmente anche se non esclusivamente su celle con chimica LiFePO_4 , con l'enfasi su applicazioni di tipo stazionario [rapporto RdS/2013/246]. In particolare è intervenuta sul progetto elettrico e geometrico della scheda elettronica, studiata per adattarsi alle caratteristiche delle applicazioni stazionarie, e specificatamente a una maggiore tensione

complessiva di batteria, mantenendo comunque una significativa attenzione all'ingombro del modulo. La nuova elettronica di modulo, pur mantenendo le precedenti caratteristiche, ha permesso di realizzare batterie con architettura più complessa, distribuita su più livelli gerarchici (modulo, stringa e batteria complessiva), consentendo quindi una maggiore affidabilità di sistema. È stato perfezionato il sistema di gestione termica, sempre basato su raffreddamento ad aria a convezione forzata e ora maggiormente integrato nell'elettronica stessa.

L'ottimizzazione dell'elettronica coinvolge anche il firmware della scheda, implementato a bordo del microcontrollore presente; sono stati pertanto analizzati i vantaggi ottenibili dalla disponibilità di un sistema di aggiornamento del firmware sul campo e analizzata la metodologia di aggiornamento del firmware stesso tramite un apposito connettore, facilmente accessibile in fase di manutenzione. Anche il software di gestione complessivo, implementato con linguaggio LabVIEW su un personal computer, tiene conto della nuova architettura, permettendo il monitoraggio e il bilanciamento di sistemi con un ulteriore livello di gerarchia.

Infine è stato sviluppato un nuovo sistema elettronico aggiuntivo, utile in configurazioni di batteria complesse, che permette la riconfigurazione dinamica della batteria con l'esclusione o l'inserimento di intere sezioni, durante il funzionamento stesso del sistema di accumulo energetico. La disponibilità di tale sistema rappresenta un deciso avanzamento dello stato dell'arte dei sistemi di accumulo energetico stazionario, permettendo un deciso incremento della manutenibilità di sistema e la pianificazione di interventi di manutenzione preventiva.

Le nuove specifiche, più ragionevoli per applicazioni stazionarie, hanno richiesto una rivisitazione di diversi aspetti del progetto elettrico del modulo, per renderlo compatibile con la nuova dimensione della stringa con la maggiore tensione. Inoltre, approfittando dell'esigenza di produrre nuovamente i circuiti stampati per la nuova versione dell'elettronica di modulo, è stata messa a frutto l'esperienza maturata durante lo svolgimento delle attività degli anni precedenti, prevedendo la revisione e il miglioramento di diversi aspetti circuitali e geometrici, per migliorare le caratteristiche e aumentare l'affidabilità dei sistemi realizzati con questi moduli.

Un aspetto determinante in un sistema di accumulo per applicazioni stazionarie consiste nella continuità di servizio e in una facile manutenibilità, l'architettura è stata arricchita della possibilità di riconfigurare dinamicamente la batteria durante il funzionamento, grazie a un modulo aggiuntivo di bypass, azionato dal software di supervisione.

Modifiche elettriche e geometriche

A titolo esemplificativo, soltanto alcune modifiche sono riportate in questo documento per i dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/246. La principale modifica apportata all'elettronica del modulo riguarda la tensione di breakdown degli interruttori a stato solido a MOSFET, usati per la matrice di connessione che permette di connettere individualmente ciascuna cella al bus di bilanciamento. Gli interruttori della matrice di connessione, come appare evidente dalla Figura 48, possono essere sottoposti, nel caso in cui sia connessa una delle celle estreme, a tensioni inverse.

In considerazione della gravità delle conseguenze di un guasto dovuto alla chiusura non prevista di uno degli switch del bus di bilanciamento, con il cortocircuito di una sezione della stringa e conseguente rischio di incendio, si è ritenuto di dimensionare gli interruttori di cella in modo che ciascuno dei due, sia quello del polo positivo sia quello del negativo, fosse in grado di sopportare da solo la tensione inversa.

Un'ulteriore integrazione apportata nello schema elettrico consiste nell'inserimento sulla scheda di tre circuiti di pilotaggio adeguati alle potenze delle ventole di raffreddamento. In vista di una maggiore ingegnerizzazione dell'assemblaggio, la disponibilità a bordo della scheda delle uscite direttamente collegabili alle ventole garantisce semplicità di montaggio ed evita l'aggiunta di plug-in esterni con i relativi cablaggi.

Per aumentare la flessibilità d'uso e l'affidabilità del modulo è stata inserita nell'elettronica di monitoraggio la possibilità di misurare la corrente complessiva di modulo non solo con un sensore di Hall esterno, applicabile al connettore dedicato al cablaggio di comunicazione e bilanciamento, ma anche con shunt resistivo sul percorso di potenza.

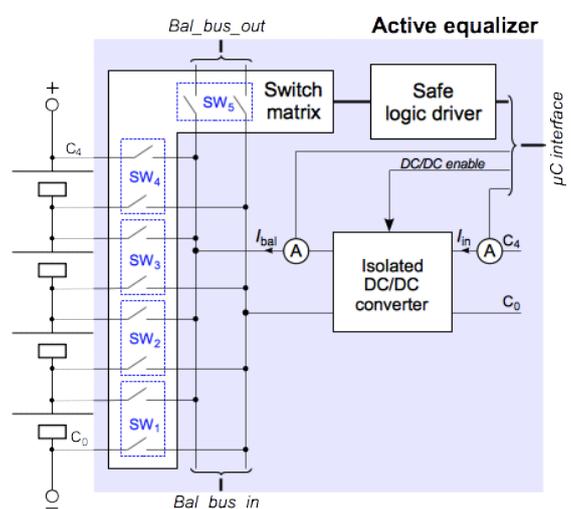


Figura 48. Schema elettrico di principio che mostra la matrice di connessione delle celle di una stringa al bus di bilanciamento

L'ottimizzazione dei moduli progettati ha riguardato anche in misura notevole il progetto geometrico della scheda elettronica. Gli obiettivi di questa attività si sono concentrati, oltre che ovviamente sulla riduzione delle dimensioni complessive del modulo, sul miglioramento complessivo dell'assemblaggio, per conseguire una significativa riduzione dei costi complessivi di modulo. L'elevata quantità di moduli richiesta nella maggior parte delle applicazioni stazionarie giustifica questa attenzione, sia per motivi economici sia per incrementare l'affidabilità riducendo la presenza di connessioni cablate interne al modulo e semplificando la gestione termica grazie al controllo integrato nell'elettronica delle ventole.

La modifica più significativa al progetto geometrico consiste nella scelta di una tecnologia realizzativa a 4 layer per compensare la maggior criticità di piazzamento e permettere il routing dei componenti nella minore area disponibile. Inoltre la presenza di piani di massa e alimentazione migliora le prestazioni di compatibilità elettromagnetica della scheda e la capacità di trasporto di corrente nella sezione di bilanciamento.

Questo arrangiamento ha ridotto notevolmente gli spazi per il posizionamento e il collegamento dei componenti, introducendo numerosi vincoli sulla posizione dei componenti stessi, ma permette di ottenere una soluzione molto più compatta, che racchiude all'interno le principali difficoltà di assemblaggio.

Una possibile causa di criticità è costituita dalla difficoltà di dissipazione termica per i componenti elettronici che si vengono a trovare tra la scheda e il coperchio e in particolare per il convertitore DC/DC di bilanciamento. Per facilitare la circolazione d'aria in prossimità di questo componente, per cui è prevedibile una dissipazione di qualche watt, è stata praticata un'apertura nel circuito stampato, a cui potrà corrispondere una griglia forata nel coperchio del modulo. La Figura 49 presenta il rendering della faccia superiore della nuova versione della scheda, in cui è evidente la scelta di un diverso connettore per il cablaggio esterno. Si tratta di un connettore rettangolare di tipo automobilistico direttamente cablato sul circuito stampato (PCB, Printed Circuit Board), che evita la presenza di un cospicuo cablaggio e dei numerosi connettori intermedi che caratterizzavano la precedente versione.

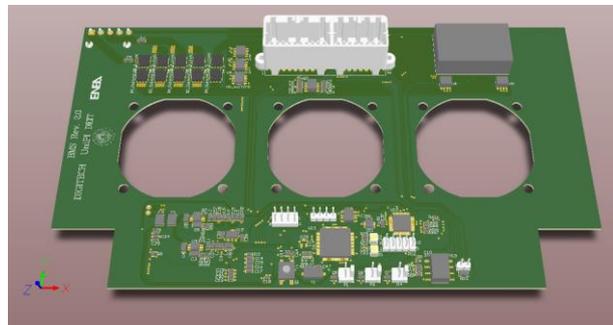


Figura 49. Rendering della faccia superiore del nuovo circuito stampato per l'elettronica di modulo

L'assemblaggio si è dimostrato uno dei punti di maggior criticità della versione precedente. Sono state pertanto dedicate risorse per riprogettare la sezione di interconnessione tra celle, sia per quanto riguarda il percorso di potenza, sia per la connessione all'elettronica di monitoraggio e controllo. Le criticità individuate riguardano principalmente due aspetti: la difficoltà costruttiva e l'affidabilità dei moduli realizzati. Infatti, se da un lato l'uso di fili garantisce una notevole libertà nella scelta e nel posizionamento dei connettori e, almeno teoricamente, una certa facilità nel posizionamento delle connessioni all'interno del modulo, dall'altra il grande volume dei cablaggi insieme alla ridotta disponibilità di spazi all'interno del modulo, ha creato problemi di collocazione e maneggevolezza delle sezioni del modulo da montare, aggravati dalla presenza costante e inevitabile di tensione nel cablaggio stesso. L'inserimento dell'elettronica "a caldo" e la possibilità non remota di contatti tra cavi interni e parti del modulo soggette a innalzamenti di temperatura incrementa inoltre la probabilità di guasti, e riduce pertanto l'affidabilità del modulo per quanto riguarda la mortalità infantile e nelle prove più impegnative dal punto di vista termico.

Sulla scheda di connessione è montato il semplice circuito di misura della corrente di modulo. Il circuito si connette direttamente agli estremi del modulo per alimentare l'amplificatore da strumentazione e allo shunt per prelevare il segnale utile. Il rendering della scheda di connessione è mostrato in Figura 50, dove la scheda è vista dalla faccia superiore, cioè quella verso l'altra scheda di connessione alle celle. Si notino le aperture che consentono la circolazione di aria per l'estrazione forzata del calore generato.

I connettori della scheda di connessione sono corrispondenti a quelli del BMS, sia meccanicamente sia elettricamente.

Modifiche e aggiunte al firmware e software

Il firmware del microcontrollore è stato aggiornato per

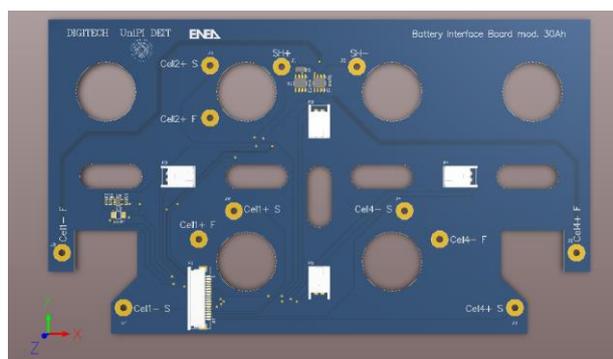


Figura 50. Rendering della faccia superiore, verso le celle della scheda di connessione con le celle

tenere conto delle modifiche apportate allo schema elettrico. Una modifica ha riguardato l'aggiunta di un nuovo comando gestito dalla scheda, che permette all'intelligenza di livello superiore di abilitare o meno il sensore di corrente interno per la misura della corrente di batteria. In questa versione della scheda i due sensori per la misura corrente di batteria sono mutuamente esclusivi. L'abilitazione del sensore interno avverrà solo nel caso in cui il sensore esterno non sia connesso alla scheda, condizione che può essere rivelata dal firmware.

L'intelligenza di livello superiore della batteria è realizzata mediante un software generale di controllo che gira su una piattaforma di tipo personal computer. Il software, in linguaggio LabVIEW, è ancora necessario al funzionamento del sistema nella presente versione; la perdita di connessione causa quindi la disconnessione del relè di sicurezza. È stata comunque intrapresa l'attività di trasferimento delle funzionalità basiche del modulo nel firmware del modulo stesso, per permettere in una delle prossime versioni il funzionamento autonomo del modulo nelle applicazioni singole. Tenendo presente le applicazioni stazionarie, dove la presenza di un PC industriale, che supervisiona il funzionamento dell'intera batteria, può essere adeguata, il software di controllo LabVIEW è stato aggiornato per poter gestire le modifiche apportate alla scheda dei moduli. Inoltre, al fine di rendere il software più flessibile, per poter essere facilmente utilizzato con diverse configurazioni della batteria, i parametri di configurazione della batteria sono inseriti mediante un file di testo che è letto dal software all'avvio.

Collaudo della scheda e validazione

La nuova scheda del BMS è stata realizzata e assemblata (Figura 51). Prima del montaggio delle versioni per i nuovi moduli, si è proceduto a un collaudo funzionale preliminare, per escludere problemi sistematici dovuti a bug introdotti nelle varie fasi di riprogettazione.

Infine, l'architettura precedente è stata arricchita con la possibilità di riconfigurare dinamicamente la batteria durante il funzionamento. Questa è una caratteristica determinante in un sistema di accumulo per applicazioni stazionarie, in quanto può garantire la continuità del servizio e una più facile manutenibilità del sistema stesso. Riconfigurabilità significa poter consentire l'inserimento o l'esclusione a caldo di una delle stringhe dal corpo della batteria, purché l'applicazione nella quale il sistema di accumulo è inserito preveda la funzionalità della stessa anche in assenza di una stringa e quindi con una tensione ridotta di $1/n$ della tensione totale, dove n è il numero di stringhe che compongono la batteria. La riconfigurabilità è stata ottenuta grazie a un modulo aggiuntivo di bypass, opportunamente azionato dal software di supervisione. La possibilità di riconfigurazione della batteria può anche costituire il primo livello di protezione di fronte al raggiungimento di condizioni critiche da parte di una delle celle di una qualunque stringa della batteria. Infatti, si può pensare di escludere soltanto la stringa che rivela la condizione critica e attivare contestualmente una richiesta di manutenzione mantenendo la continuità del servizio, piuttosto che disinserire completamente la batteria e interrompere quindi il servizio.

Il prototipo del circuito di bypass è stato fabbricato su un PCB a doppia faccia con spessore delle linee di rame di $100\ \mu\text{m}$ per facilitare la conduzione delle alte correnti in gioco. La forma della scheda e la posizione delle tre terminazioni facilita il collegamento del bypass alle celle del modulo. I MOS sono posti in parallelo due a due, in modo da poter sopportare la corrente di targa massima e sono disposti sulla scheda come mostrato in Figura 52a. Si noti come sia stato utilizzato un dissipatore raffreddato a liquido per permettere la rimozione del calore generato dagli interruttori accesi. Il dissipatore si attacca al lato componenti della scheda e si collega al circuito di raffreddamento a liquido, come mostrato in Figura 52b.

Il prototipo di circuito MBS (Module Bypass Switch) sopra descritto è stato quindi collaudato per validarne le funzioni ed estrarne le caratteristiche. Il modulo è stato pilotato tramite un'interfaccia



Figura 51. Lato superiore della scheda del BMS completamente montata

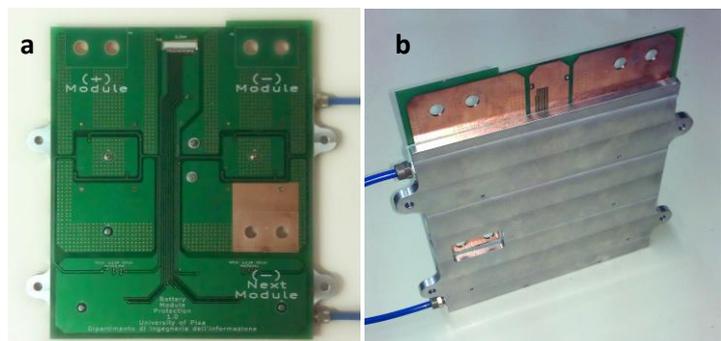


Figura 52. a) Fotografia di un lato della scheda elettronica del circuito di bypass; b) Fotografia del dissipatore a liquido sull'altro lato della scheda

basata su microcontrollore che controlla i relé allo stato solido S, in modo da garantire il dead time opportuno. La temperatura del contenitore dei MOS è stata rilevata tramite una termo camera FLIR i50 focalizzata sui dispositivi e la tensione sul MBS letta tramite un multimetro Keithley 2420, in modo da valutare la potenza dissipata.

I risultati dell'esperimento di caratterizzazione sono mostrati in Figura 53, dove è riportata in funzione del tempo la corrente che attraversa il bypass con passi di 20 A e la temperatura misurata sul MOS. Si noti come, per correnti che raggiungono i 160 A, la temperatura del transistor si mantenga al di sotto dei 100 °C, quando la temperatura ambiente e del liquido refrigerante è di 20 °C. La potenza dissipata in condizioni massimali è di 66 W, per cui si può ricavare il valore della temperatura di giunzione, conoscendo la resistenza termica ϑ_{jc} sopra menzionata. Tale valore è di 133 °C, ben al di sotto del limite massimo di 175 °C sopportabile dal MOS: Si può quindi affermare che il bypass progettato e costruito è in grado di sopportare correnti continue di 160 A senza problemi fino a temperature del liquido refrigerante che raggiungono i 50 °C.

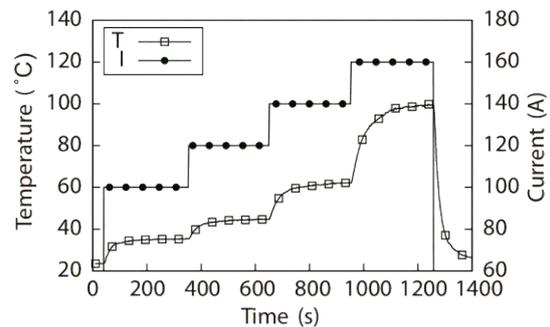


Figura 53. Risultati del collaudo del prototipo di bypass con correnti di commutazione fino a 160 A

Progettazione esecutiva di un sistema di accumulo per migliorare l'efficienza di una metropolitana leggera

L'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione) ha svolto un'analisi, con dati sperimentali ottenuti insieme ad ENEA, per definire le sollecitazioni a cui un sistema di accumulo elettrochimico, di tipo gestionale, è sottoposto durante il suo funzionamento in una sottostazione di alimentazione di una rete tranviaria [rapporto RdS/2013/251]. È stata simulata la struttura elettrica della tranvia e dei tram e la gestione della movimentazione tramite le effettive tracce orarie. È stata inoltre definita una logica di gestione dello stato di carica degli accumulatori e un criterio di dimensionamento della capacità energetica di accumulo, utilizzando, in parte, le conoscenze ed i risultati ottenuti nelle attività, svolte negli anni precedenti, nell'esercizio della funicolare di Bergamo, equipaggiata con una batteria al litio fornita dall'ENEA.

Per una verifica fattuale delle valutazioni ed analisi effettuate è stato preso in esame il sistema tramviario "Tramvia delle Valli Bergamasche" di proprietà della TEB S.p.A., realizzato circa 10 anni fa e che dispone di treni con frenatura elettrica a recupero sulla rete di trazione.

L'utilizzo degli azionamenti elettrici per la trazione dei rotabili ha permesso negli ultimi anni, soprattutto grazie alla rivoluzione tecnologica dei componenti elettronici, di avere la possibilità oltre che della frenatura meccanica anche della frenatura elettrica dei convogli. Come noto infatti, le macchine elettriche sono macchine completamente reversibili, ossia possono funzionare indistintamente da motore o da generatore-freno se opportunamente controllate. Come facilmente intuibile, ciò si sposa bene con tutti quei sistemi, inclusi i sistemi tramviari, in cui sono richieste fasi di accelerazioni e/o frenature frequenti, in quanto la frenatura elettrica permette il cosiddetto "recupero dell'energia". In pratica, durante le fasi di accelerazione l'energia elettrica viene trasformata in energia cinetica, parte della quale può però essere recuperata nel corso della fase di frenatura. Questa energia recuperata oggi viene spesso convertita, tutta o in parte, in calore tramite una resistenza di frenatura e finisce quindi dispersa e inutilizzata. In alcune applicazioni particolari, tipo i trasporti, può, invece, essere assolutamente conveniente riutilizzare questa energia di frenatura, con conseguente aumento dell'efficienza energetica del sistema complessivo. Specialmente in sistemi in cui i valori di energia cinetica sono elevati e si ha la presenza di moto vario la frenatura elettrica a recupero permette non solo una riduzione dei dispendi energetici, ma garantisce spesso anche buoni e incontestabili vantaggi economici.

Nei sistemi tranviari più semplici e comuni, i punti di alimentazione (sottostazioni) non permettono l'inversione del flusso di corrente, quindi, in generale, l'energia di frenatura di un tram può essere recuperata solo in caso ci siano altri tram capaci di assorbire quell'energia e qualsiasi *surplus* di quest'ultima deve essere necessariamente tagliata (e quindi persa per dissipazione in calore).

Nel caso invece, in cui in uno o più punti della rete di alimentazione, tipicamente in prossimità di una sottostazione, sia presente una certa capacità di stoccaggio, quest'ultima può assorbire e immagazzinare energia durante la frenata di qualche tram, e rinviarla al sistema di trazione, quando c'è carico sufficiente sulla linea. Questa soluzione promette di aumentare la quantità di energia recuperata in modo significativo.

Chiaramente, la valutazione della quantità di recupero dell'energia cinetica in frenata richiede uno strumento di simulazione che sia in grado di simulare le equazioni di rete, le equazioni dinamiche del veicolo, l'autista, e le

diverse fasi di funzionamento, come ad esempio accelerazione, marcia a velocità costante, coasting (quando presente), e frenatura. Per una visione complessiva e realistica del problema devono essere prese in considerazione le diverse fasi della giornata, con differenti frequenze di viaggio, ed eventualmente la natura stocastica di alcune parti del viaggio, come in genere il tempo trascorso presso le fermate.

Il sistema di stoccaggio nella sottostazione può essere installato con l'interposizione di un convertitore DC/DC, o collegato direttamente alla sbarra DC. Il presente studio si concentra sull'installazione del sistema di accumulo gestionale, direttamente presso la sbarra, dimostrandone un uso molto tecnico ed economico.

In una visione del tutto generale, l'installazione del sistema di accumulo può avvenire direttamente a bordo del veicolo o all'interno di una delle sottostazioni. Chiaramente, nel primo caso i vantaggi energetici ottenibili sono maggiori in quanto si riesce a recuperare buona parte dell'energia di frenatura non avendo la rete di contatto come intermezzo tra il sistema di accumulo e la macchina elettrica. Dall'altro lato però questa soluzione richiede un'installazione del sistema di accumulo su ogni veicolo tranviario e quindi una moltiplicazione dei costi proporzionalmente al numero di veicoli. Inoltre, come facilmente intuibile, l'installazione dell'accumulo a bordo tram causa un appesantimento svantaggioso del convoglio stesso. Nel secondo caso invece, tra l'elemento elettrico reversibile a bordo tram (macchina elettrica) e il sistema di accumulo è presente la rete di alimentazione che chiaramente causa perdite intrinseche di potenza e quindi energie recuperate inferiori. Inoltre, se la distanza tra il sistema di accumulo e il tram in frenatura è elevata a causa della resistenze longitudinali di linea il recupero potrebbe essere spesso bloccato a causa del raggiungimento del limite di tensione massima ammissibile. Dall'altro lato però tal soluzione garantisce di non dover installare a bordo tram ulteriore peso da trasportare e soprattutto richiede l'installazione di un solo sistema di accumulo o comunque di un numero molto limitato.

Per i motivi suddetti, la soluzione che è stata presa in considerazione e portata avanti in questo lavoro è l'installazione di un sistema di stoccaggio gestionale direttamente a terra in una sottostazione piuttosto baricentrica per il sistema complessivo, in modo da garantire una massimizzazione dei vantaggi energetici.

Modello e caso studio

Una tranvia in genere ha diverse stazioni di fermata (connesse al carico e scarico passeggeri) e sottostazioni elettriche (connesse all'alimentazione dei rotabili). Una versione molto semplice del modello complessivo della tramvia è mostrata in Figura 54. Per garantire una buona visibilità del modello, la figura riporta il caso in cui si hanno solamente quattro sottostazioni di alimentazione e quattro tram in linea. Chiaramente il modello complessivo sviluppato garantisce la presenza delle dieci sottostazioni elettriche (SSE) presenti lungo il tracciato coperto dalla tranvia e la possibilità di una gestione contemporanea di dieci tram in linea; condizione connessa al numero massimo di tram presenti nelle ore di punta, indicati da TEB S.p.A.

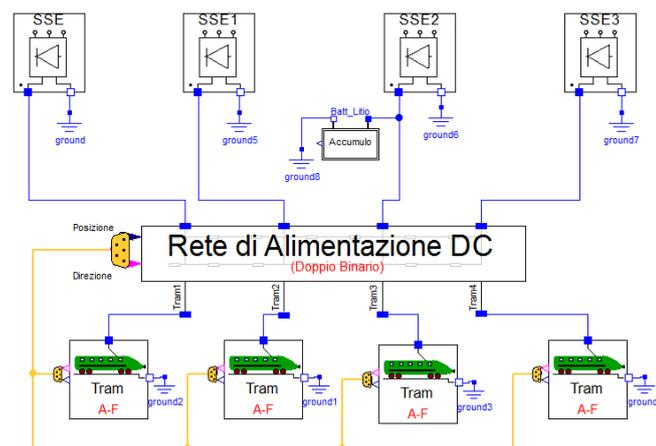


Figura 54. Interfaccia semi-completa del simulatore tranviario realizzato

Si fa presente fin da ora, che nelle simulazioni presentate in seguito si farà sempre riferimento a un modello complessivo con 10 sottostazioni e un numero opportuno dei tram in servizio a seconda della fascia oraria simulata (feriale, festivo scolastico, festivo non scolastico).

Questo schema risulta utile ai fini della presentazione dei principali sottosistemi in cui il sistema tranviario complessivo è stato suddiviso, che come si può notare sono:

- Sottostazione Elettrica
- Rete di Alimentazione

- Convoglio tranviario (con pilota incorporato)
- Sistema di accumulo gestionale (batteria al litio)

In Figura 54 le linee blu rappresentano i collegamenti elettrici tra i vari sottosistemi, mentre quelli gialli rappresentano un bus di informazione che trasporta le informazioni chiave di ogni tram (posizione e direzione) alla linea di contatto per la gestione ottimale delle resistenze di linea durante il moto dei tram e delle connessioni dei vari pantografi alle opportune sezioni sulla linea di contatto. In questo caso, come si vede, il sistema di accumulo è installato in corrispondenza della SSE2 e quest'ultimo può essere abilitato o non in funzione del tipo di simulazione necessaria. Tutte le componenti dello schema di Figura 54 sono state schematizzate in modelli.

La sottostazione elettrica, come noto, è in prima approssimazione definibile come la sorgente di energia da cui il tram assorbe energia elettrica necessaria per il suo moto. Le SSE stesse, sono ovviamente poi interfacciate con la rete di distribuzione alternata trifase in M.T. (in genere a 15-20 kV), che apportano l'energia necessaria alle SSE proveniente dalle centrali di produzione di energia elettrica a monte. Nella SSE oltre a un eventuale trasformatore a monte per l'abbassamento della tensione trifase a 15 kV, si ha un ponte di raddrizzamento a diodi per ottenere in uscita dalla sottostazione una tensione continua necessaria per l'alimentazione dei tram. Le sottostazioni di alimentazione delle linee tranviarie sono in genere basate su ponti a diodi a 12 impulsi.

Poiché la valutazione degli effetti delle armoniche è fuori dallo scopo di questo studio, la modellazione prende in considerazione solo la componente continua di questa sorgente. Per tal motivo, per ogni sottostazione è stato utilizzato il noto modello equivalente in corrente continua.

Nel caso della simulazione del tram, è inutile modellare perfettamente l'azionamento elettrico sviluppando ad esempio un modello per l'inverter e per il motore, in quanto quello che sostanzialmente e effettivamente interessa, ai fini della buona riuscita degli obiettivi delle simulazioni in oggetto, è capire la potenza che trasferisce l'azionamento alle ruote durante il moto del tram e viceversa. Inoltre, si fa presente che l'arco temporale di simulazione nel caso in esame non è di pochi secondi ma dell'ordine di diversi minuti e perciò modelli precisi dell'inverter mal si prestano agli scopi del presente lavoro. Lo schema complessivo realizzato per la modellazione del tram, che permette di discutere di alcuni importanti aspetti della modellazione effettuata, si riporta in Figura 55. Nel caso della modellazione effettuata, l'attenzione è stata posta su due argomenti ritenuti abbastanza significativi: efficienza dell'azionamento e sfioratore di potenza (dettagli riportati nel rapporto RdS/2013/251).

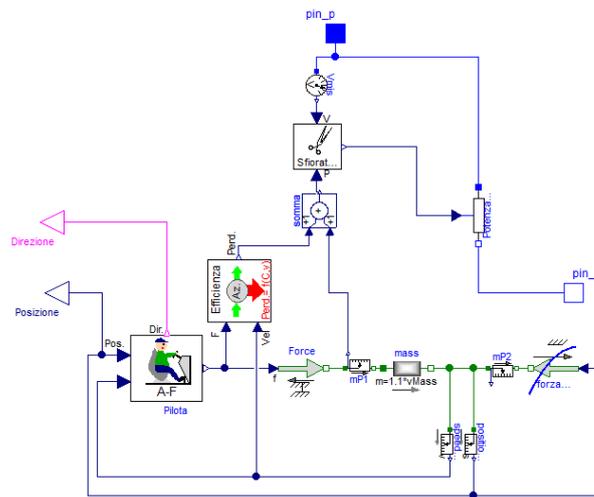


Figura 55. Modello con pilota completo del tram implementato su Dymola

Per quanto riguarda la potenza assorbita o erogata dal convoglio/tram durante il ciclo, invece, si ottiene il grafico in Figura 56. Si osserva come inizialmente la potenza, giustamente, cresca in maniera lineare in quanto la caratteristica meccanica di trazione, come già visto presenta uno sforzo costante fino alla velocità base. Perciò, poiché, la potenza è il prodotto di forza per velocità essendo la forza costante e la velocità crescente pressoché linearmente, si ottiene un andamento lineare fino alla velocità base. Oltre la velocità base, invece la potenza resta costante in quanto lo sforzo di trazione decresce in maniera circa iperbolica, e il prodotto tra forza e velocità

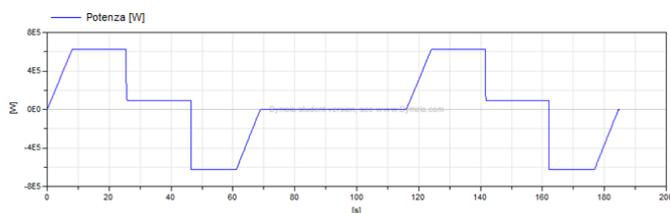


Figura 56. Andamento della potenza assorbita/erogata dal convoglio durante il ciclo

instate per istante resta costante. Quando il tram è arrivato alla velocità massima lo sforzo è pari a quello della forza resistente attuale e essendo la velocità costante la potenza resta anche qui costante, ovviamente a un valore più basso rispetto a quando il convoglio era in fase di accelerazione.

Successivamente, quando interviene la fase di frenatura la potenza inverte il segno in quanto in tal fase si ottiene una potenza erogata dal sistema e non più assorbita. In questo caso, ovviamente prima si trova il tratto a potenza costante, in quanto lo sforzo incontra prima la limitazione di potenza e quindi segue un andamento pressoché iperbolico, e successivamente si incontra il tratto a potenza decrescente in maniera lineare quando lo sforzo di frenatura è pari a quello massimo ammissibile e costante. Chiaramente dopo il tempo fisso o random di fermata, per completare il ciclo le curve di potenza si ripetono come in precedenza e valgono le stesse considerazioni.

Nel caso in esame, in cui un accumulo elettrochimico è installato in una posizione fissa, tipicamente vicino a una sottostazione, un modello sufficientemente completo per gli scopi della trattazione (modellazione "CR modificata") può essere quello illustrato in Figura 57.

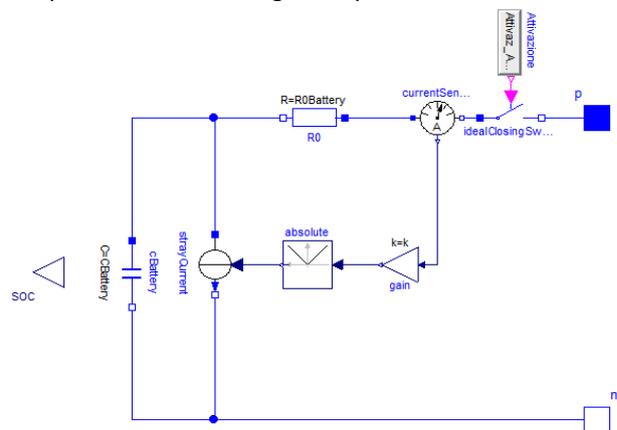


Figura 57. Modellazione del sistema di accumulo (batteria al litio)

Il modello utilizzato in questo lavoro, per il sistema di accumulo è legato all'ipotesi di poter considerare in prima approssimazione la relazione tra la forza elettromotrice (E) e lo stato di carica della batteria stessa (SOC) lineare (Figura 58). La modellazione di tal relazione si presta bene a essere rappresentata tramite la famosa relazione lineare di un condensatore: $Q = CV$ in cui C è la capacità del condensatore (Farad), Q e la quantità di carica (Coulomb) e V la tensione ai capi del condensatore (Volt).

L'idea funziona nell'ipotesi di assumere per la condizione di cella completamente scarica un condensatore con ancora una carica interna (ossia non completamente scarico). A tal carica sarà associata la tensione minima della cella. Alla carica massima della batteria invece sarà associata la tensione massima della batteria e quindi del condensatore.

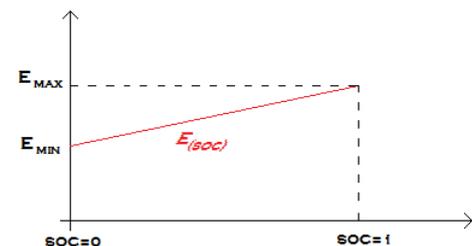


Figura 58. Andamento lineare di E in funzione del SOC

La linea considerata è una metro-tranvia a doppio binario in sede completamente riservata. Ha una lunghezza di 12,6 km ed è dotata di sedici fermate, compresi i capilinea. È armata sia con rotaie Vignole sia con quelle a gola; lo scartamento adottato è di 1435 mm. Presenta trenta incroci a raso sia stradali sia pedonali regolati da semafori asserviti al servizio tranviario. La velocità massima raggiungibile dalle vetture è pari a 70 km/h, mentre la velocità commerciale è pari a 24,95 km/h. In Figura 59 sono riportate le posizioni delle varie stazioni su tutto il tratto coperto dal tram.



Figura 59. Posizioni [m] delle stazioni della linea tranviaria



A fini della simulazione sono stati raccolti i profili orari seguiti durante i vari mesi dell'anno dalla tranvia in esame. In prima analisi quest'ultimi possono essere suddivisi in due periodi principali, il *periodo estivo* e il *periodo invernale*, connessi principalmente all'apertura o meno delle scuole, con un'ulteriore suddivisione in punta morbida e festivo.

Per realizzare le simulazioni dei tre tipi di servizio, ossia punta, morbida e festivo, nel simulatore sono stati sviluppati tre diversi tipi di "Rete di alimentazione". La prima prevede la connessione di 10 tram, la seconda di 5

tram ed infine l'ultima prevede la connessione di 3 tram. Ovviamente tutti e tre i modelli prevedono il collegamento delle dieci SSE.

Simulazione dello stato attuale e validazione del simulatore

Sulla base di numerosi ipotesi e strategie, si sono ottenuti numerosi risultati dalle diverse simulazioni svolte. A titolo esemplificativo, si riportano i valori orari delle energie di maggiore interesse: l'energia erogata dalle SSE e l'energia recuperata. In Tabella 8 si riportano i valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dei recuperi ottenibili nelle varie giornate "tipo".

Tabella 8. Valori giornalieri dell'energia erogata dalle SSE e dell'energia recuperata.

TIPO DI GESTIONE	ENERGIA EROGATA DALLE SSE		ENERGIA RECUPERATA	
	[GJ]	[MWh]	[GJ]	[MWh]
GIORNO FESTIVO	14,217	3,949	0,595	0,165
FERIALE-SCOLASTICO	38,362	10,656	3,407	0,946
FERIALE-NON SCOLASTICO	27,387	7,608	1,245	0,346

È stata anche effettuata una verifica della validità del modello e delle simulazioni fatte. In altre parole, tale attività permette di effettuare delle analisi di congruenza e capire se effettivamente ci sono o meno dei riscontri positivi tra alcuni valori significativi forniti dal simulatore e quelli misurati e noti dalla realtà fisica. Con l'obiettivo di verificare i risultati del simulatore è stata confrontata l'energia totale annua erogata dalle sottostazioni elettriche ottenuta dalle simulazioni, ai consumi annui rilevati dal gestore durante l'anno 2012. I dati forniti dal gestore della tranvia relativi ai vari consumi annuali hanno portato ad un consumo complessivo annuo che ammonta a circa 3988,431 MWh.

C'è da dire che all'interno dell'erogazione complessiva annua (reale) delle SSE, è compresa sia la quota parte di energia consumata relativa ai servizi ausiliari del sistema, sia i recuperi di energia di frenatura in linea che realmente i tram riescono a realizzare tra loro. La società di gestione, ipotizza e stima che l'energia necessaria ai servizi ausiliari complessivi annui ammonti a circa 1/3 dell'energia erogata dalle SSE. Confrontando l'energia annua erogata dalle SSE nel caso di recupero in linea con il sistema di recupero effettivamente utilizzato da TEB (ossia non modulato) ottenuta dalle simulazioni precedenti con l'energia complessiva annua erogata dalle SSE al netto della quota parte dei servizi ausiliari (1/3 dei 3899 MWh) si ottiene:

- En. annua erogata dalle SSE nel caso di recupero in linea (con sistema TEB) → 2868,5 MWh
- En. annua erogata dalle SSE realmente (al netto dei servizi ausiliari) → 2658,9 MWh

In prima approssimazione, perciò, considerando anche i dati disponibili, il simulatore permette di ottenere risultati decisamente congrui con la realtà.

Progetto di massima e scelta del sistema di accumulo

L'accumulo può in genere avere tre funzioni:

- *Strategica*: l'accumulo è necessario per il sistema in cui è inserito per far sì che quest'ultimo riesca a svolgere le funzioni per cui è stato realizzato. Un esempio è il serbatoio di benzina per le moto, o le batterie per i giochi portatili dei bambini.
- *Gestionale*: l'accumulo ha solo una funzione di miglioramento e ottimizzazione delle funzionalità del sistema, anche se in realtà non sarebbe indispensabile.
- *Intrinseco*: l'accumulo è per la natura del sistema stesso già al suo interno. Si pensi ad esempio alle inerzie nei sistemi di tipo meccanico.

Nel caso in esame chiaramente la scelta dell'accumulo riguarda un *accumulo di tipo gestionale*, in quanto l'installazione dello stesso nel sistema tranviario preso a riferimento garantisce un miglioramento dell'efficienza energetica complessiva della tranvia. La scelta che è stata portata avanti per questa applicazione è quella di utilizzare un sistema di accumulo di tipo elettrochimico e precisamente è stato deciso l'utilizzo di una batteria al litio alta potenza.

L'ipotesi di partenza per la scelta dell'accumulo è quella di utilizzare una batteria che possa rimanere nel sistema per almeno dieci anni senza subire degrado eccessivo legato al tipo di funzionamento a cui è soggetta. Poiché,

come noto, il *cycle life* delle batterie è fortemente dipendente dalla profondità di carica-scarica dei cicli a cui le stesse sono soggette, per garantire un alto numero di cicli e quindi una vita di almeno dieci anni, la batteria utilizzata nelle simulazioni è una batteria molto sovradimensionata (per quanto riguarda l'energia). Il SOC infatti come risulta dalle simulazioni non varierà mai più del 9% (nella fascia oraria di punta del periodo invernale), ma nella maggior parte dei casi resta entro il 6%. Pertanto si ritiene plausibile che la batteria sia in grado di garantire il funzionamento previsto per la durata dei dieci anni.

La batteria scelta per compiere le simulazioni è una batteria al litio da 100 Ah. Per quanto detto sopra perciò, la sua corrente nominale è di 100 A e le correnti di carica e scarica massima a cui può essere sottoposta durante la sua vita sono di 1000 A, purché di tipo impulsivo. Le tensioni di cella massima e minima considerate per la batteria in questione durante le simulazioni sono di 4,1V e 3,4 V. La batteria ha 220 celle in serie, a cui corrisponde una tensione minima di 748 V e una tensione massima di piena carica pari a 902 V. Lo stato di carica di partenza per la batteria durante le prove è stato considerato pari a 0,5, ossia con batteria a metà carica. Per la resistenza interna (di cella) si è supposto un valore di 0,0003 Ω .

Risultati delle simulazioni e conclusioni

Le simulazioni sono state effettuate considerando la situazione attuale con un solo sistema di accumulo ed una situazione evolutiva in cui ci siano due sistemi di accumulo distribuiti in maniera ottimale nel sistema tranviario. Tali simulazioni sono di fondamentale importanza ai fini pratici poiché permettono di stimare i vantaggi che effettivamente il sistema di accumulo di tipo gestionale potrebbe garantire nella realtà fisica del problema.

Lo studio mostra come l'installazione di un sistema di accumulo nelle sottostazioni di alimentazione di una linea tranviaria, in generale, può consentire una diminuzione dell'energia assorbita dalla rete con un consistente risparmio energetico ed economico nell'esercizio degli impianti. Ciò è dovuto al fatto che l'accumulo permette di svincolare il recupero dell'energia da un assorbimento *just in time* della stessa dai treni presenti in linea.

Nel caso studio della Tranvia delle Valli Bergamasche le stime del risparmio energetico risultano quelle riportate nella Tabella 9.

Tabella 9. Stima del risparmio energetico per la rete tranviaria

Caso	Energia erogata da SSE [MWh]	Minore erogazione [MWh]	Risparmio %
Sistema attuale	2868	-	-
Un solo sistema di accumulo nella SSE a metà linea	2612	256	9
Due sistemi di accumulo nelle SSE alle estremità della linea	2318	550	19

E' da notare che se si modificassero i controlli dei treni in modo da poter effettuare un recupero modulato sarebbe possibile aumentare ulteriormente il risparmio energetico con lo stesso accumulo, come ad esempio nel caso di un solo sistema di accumulo si passerebbe dal 9 al 14%.

Al fine del dimensionamento del sistema di accumulo, per lo schema più semplice (e meno costoso) di accumulatore direttamente collegato alla linea di trazione, si nota che la variazione dello stato di carica è limitata: per un sistema da 100 Ah di capacità è di circa il 9%. Pertanto si può dedurre che il flusso di energia scambiato non dimensiona l'accumulo.

Dimensionamento, realizzazione e verifica sperimentale delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica

L'Università di Pisa ha concluso la parte relativa al completamento dell'impianto ed alla campagna sperimentale di raccolta per la verifica e l'analisi delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica [rapporto RdS/2013/250].

L'impianto è stato realizzato in modo da poter verificare il funzionamento con: un accumulo minimo, ma in grado di limitare la potenza massima assorbita dalla rete, con un sistema di accumulo di più ampie dimensioni in modo da rendere minimo lo scambio di energia con la rete (massimizzazione dell'uso locale dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico). In entrambe le condizioni di funzionamento sono state individuate le sollecitazioni in corrente dei sistemi di accumulo.

L'impianto

L'impianto è rappresentativo di una tipica utenza domestica ed è stato localizzato nella casa del guardiano dei laboratori dell'Università di Pisa nella sede di San Piero a Grado. Il carico elettrico dell'utenza è caratterizzato dalle energie giornaliere riportate in Tabella 10.

Tabella 10. Carico elettrico dell'utenza di riferimento

Giorno	18	19	20	21	22	23	24
Energia FM [Wh]	3127	3207	3150	2843	4126	3006	3160
Energia Luce [Wh]	2534	2689	4228	2586	5196	2701	2737
Energia Tot [Wh]	5661	5896	7378	5429	9322	5707	5897

L'impianto fotovoltaico utilizzato per alimentare l'utenza prescelta è costituito da 14 pannelli, ripartiti in 2 stringhe collegabili in serie o in parallelo, fissati su una struttura metallica appoggiata al suolo e orientata verso sud con inclinazione di 30°, con potenza nominale di picco 249 W.

Come accumulo elettrico sono stati utilizzati due pacchi di accumulatori al litio polimero prodotti da Kokam, uno dei quali mostrato in Figura 60.

Ogni pacco è costituito da 12 accumulatori, collegati in serie, con i seguenti dati caratteristici:

- corrente di scarica a 1 ora 70 Ah
- V nominale 3,7 V
- massima corrente di scambio 500 A per 10 s.

La gestione in energia dell'accumulo associato a un'utenza domestica in presenza di una produzione fotovoltaica può avere diversi obiettivi. Le modalità di gestione che, al momento, consentono di migliorare l'economicità della fornitura di energia elettrica nel suo complesso per l'utenza in questione sono sostanzialmente il *peak shaving* e la *minimizzazione dello scambio con la rete*.



Figura 60. Pacco di accumulatori al litio polimerico

Il *peak shaving* consente, a seconda del tipo di contratto stipulato, di evitare di pagare le penali per superamento della potenza contrattuale o, come più comune nelle piccole utenze domestiche, di evitare il superamento della soglia che provoca il distacco della fornitura. In quest'ultimo caso il beneficio consiste essenzialmente nel poter stipulare un contratto per una potenza più bassa di quella complessivamente assorbita dai carichi nella condizione di picco, con conseguente risparmio sui costi legati alla potenza contrattuale. Nel caso italiano, in particolare, poter mantenere il contratto D2 usi domestici residenti da 3 kW consente anche di mantenere la struttura tariffaria per scaglioni che, per consumi fino a circa 2,5 MWh annui, consente, a parità di consumo, un risparmio rispetto ad un contratto D3 usi domestici sempre da 3 kW.

Nella prospettiva poi che le varie forme di incentivazione della produzione da fonte fotovoltaica si vadano via via riducendo, arrivando, di fatto, ad una remunerazione dell'impianto derivante dal mancato acquisto di una parte di energia dalla rete e dalla vendita di energia alla rete stessa, la massimizzazione del ricavo possibile deriva dalla minimizzazione dell'energia scambiata con la rete. Infatti le componenti legate al trasporto vengono pagate per la sola energia effettivamente scambiata con la rete e le quote relative all'acquisto e vendita di energia risultano differenziate risultando più basso il prezzo di cessione alla rete rispetto a quello di acquisto. Venendo poi ad esaurirsi i meccanismi di compensazione tipo "scambio sul posto" la minimizzazione del costo della fornitura non deriva dal minimizzare il saldo tra energia acquistata e ceduta, ma dal minimizzare la somma, non algebrica, dell'energia acquistata e di quella ceduta, ovvero dal mantenere il più possibile costante (ed eventualmente nullo) lo scambio con la rete.

Entrambi gli obiettivi di gestione possono anche essere associati ad eventuali servizi di rete (come la regolazione della frequenza) che, in prospettiva, l'utente potrà trovare conveniente rendere disponibili.

La sperimentazione

Per verificare le sollecitazioni del sistema di accumulo è stata svolta una campagna di misure. Le sezioni di misura sono state scelte in corrispondenza dei morsetti in c.a. dei diversi componenti; per l'utenza domestica è stata considerata la potenza complessivamente assorbita. Le grandezze misurate in ogni sezione sono state: potenza attiva, potenza reattiva, potenza apparente, fattore di potenza, tensione e corrente.

La Figura 61 riporta un diagramma di carico giornaliero tipico dell'utenza domestica. La potenza, la corrente e la tensione nella sezione di alimentazione della batteria sono acquisite dal sistema di controllo.

Nella Tabella 11 è espresso il bilancio energetico dell'impianto sperimentale di un giorno tipico.

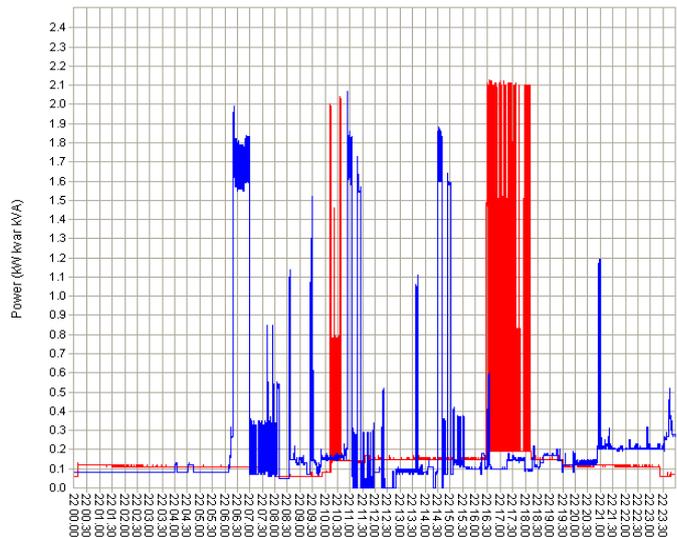


Figura 61. Potenze assorbite dall'utenza: il diagramma in blu è relativo al circuito luce e quello rosso al circuito forza motrice

Tabella 11. Bilancio di un giorno tipico

Energia giornaliera		
Carico 22-09-13 [Wh]	Fotovoltaico [Wh]	Differenza [Wh]
9302	15840	6538

La Figura 62 mostra un confronto tra la produzione PV ed il carico richiesto.

Nel caso di una gestione tesa a limitare i picchi di richiesta alla rete, le correnti di scambio dell'accumulatore sono ridotte e in relazione alla potenza massima "tagliata". Ad esempio nel caso dell'impianto sperimentale se si pone la massima potenza scambiata con la rete a 1,5 kW, la massima potenza erogata dalla batteria sarebbe di poco meno di 1 kW, mentre quella assorbita per la ricarica può essere limitata a valori ancora più bassi avendo da caricare un'energia di circa 0,5 kWh per poter effettuare correttamente il servizio di limitazione del picco. Questi valori sono analoghi a quelli che si possono facilmente dedurre anche in riferimento al carico tipico dell'utenza domestica.

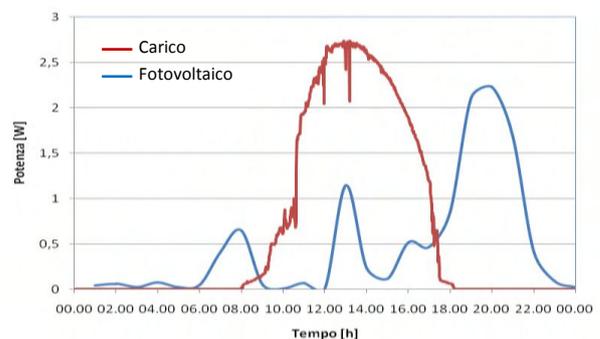


Figura 62. Confronto tra carico e produzione PV

Sviluppo, messa a punto e sperimentazione di un sistema combinato batterie al litio ferro fosfato/FER per applicazioni in bassa tensione

L'Università di Palermo ha completato la realizzazione e la verifica sperimentale dell'impianto con fonti rinnovabili con l'integrazione nell'apparato di un sistema di accumulo al litio (in sostituzione delle batterie al piombo), dimensionato congiuntamente con ENEA, con il perfezionamento e la messa a punto, attraverso una campagna di test sperimentali, dell'intero sistema (logico e fisico) di controllo dell'apparato secondo il modello MASs (Multi Agent Systems), integrando i controllori delle unità costituenti il sistema di power conditioning, l'unità di controllo del sistema di protezione d'interfaccia e di comunicazione verso la rete e il BMS del pacco batterie [rapporto RdS/2013/248 e 249].

Le attività sono state svolte in due fasi: la prima relativa all'integrazione fisica e funzionale, nel sistema ibrido accumulo-FER, di un pacco batterie costituito da 250 celle al litio ferro fosfato (per una capacità complessiva di 16 kWh), e la seconda concentrata sulla sperimentazione e sulla verifica della funzionalità e dei vantaggi del sistema di accumulo. Le attività sono state condotte in sinergia con il personale tecnico di ENEA e con la collaborazione dell'azienda Layer Electronics s.r.l. di Erice (TP).

Integrazione e messa a punto dell'impianto

L'attività inizia quando il sistema di accumulo agli ioni di litio, acquistato da ENEA secondo quanto previsto nell'accordo di collaborazione con l'Università di Palermo, è stato reso disponibile per l'avvio delle attività. La Figura 63 mostra il pacco batteria e il relativo BMS che sono stati realizzati in modo da risultare integrati in un unico chassis, mostrandosi come una costruzione compatta e facile da spostare in fase di sperimentazione.

Preliminarmente è stato affrontato il problema della comunicazione tra il dispositivo e il BMS. Il circuito di comunicazione non era stato progettato per gestire tale protocollo di comunicazione, pertanto è stato necessario sostituire il processore precedentemente utilizzato con un circuito OLIMEX su cui è installato un microprocessore della ST serie STM 32, attraverso il quale realizzare la comunicazione con il BMS. Il circuito consente di interfacciare il microprocessore ATMEGA 16 con il BMS.

Dopo le modifiche hardware, è stato sviluppato un nuovo protocollo di comunicazione tra il dispositivo e il BMS tramite il collegamento realizzato. Stante le peculiarità del BMS, è quest'ultimo che fornisce al convertitore gli input per l'erogazione della corrente di carica verso le batterie Li-ione, al contrario di quanto accade normalmente nella ricarica di batterie al piombo.

Durante le prove di comunicazione, tuttavia, sono stati rilevati dei parametri anomali riguardanti la temperatura di alcune celle della batteria. Con il supporto del centro assistenza del produttore dell'elettronica di controllo del BMS si è provveduto ad una verifica hardware delle nove unità preposte al monitoraggio delle celle del pacco batteria, da cui è emerso un malfunzionamento di una delle unità. Sono state quindi apportate modifiche che hanno riguardato essenzialmente le schede di controllo del dispositivo.



Figura 63. Vista della parte interna del pacco batterie

Risultati dell'attività sperimentali

Nel corso dell'attività, sono state eseguite molteplici prove in condizioni reali di funzionamento, integrando il sistema sviluppato (comprendente il pacco-batterie al litio ferro fosfato per una capacità complessiva di 16 kWh e l'insieme degli apparati di interfaccia - di potenza e di segnale - di controllo e di protezione), in una rete elettrica di distribuzione di bassa tensione attualmente in esercizio, al fine di verificare sperimentalmente sul campo l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione implementate. Per consentire lo svolgimento delle prove in diverse condizioni di esercizio nei tempi previsti, si è preferito collegare l'intero impianto alla rete di bassa tensione dello stabilimento della Layer Electronics s.r.l. (Erice,TP), attrezzato per tali prove e con le caratteristiche di collegamento alla rete elettrica compatibile con le specifiche dell'impianto, comprensivo di generatori fotovoltaici, e del dispositivo di gestione e controllo sviluppato.

Il dispositivo è stato testato in collegamento alla rete:

- con diversi regimi di scarica, per testare le prestazioni delle batterie;
- in diverse condizioni di produzione dell'impianto FER, per testare la capacità del dispositivo di andare incontro alle richieste della logica di controllo;
- in assenza di rete ed in condizioni di alimentazione in isola dei carichi dell'impianto a cui è collegato;
- variando la tensione della rete anche significativamente rispetto al valore nominale (condizioni limite per il dispositivo di interfaccia).

Le diverse condizioni di prova consentono di avere un quadro completo del comportamento del sistema ibrido FER-accumulo. Per simulare il carico è stato utilizzato un banco di resistori trifase da 15 kW e tre banchi di resistori monofase, ciascuno da 75 kW.

Le prove effettuate possono essere distinte nelle seguenti categorie:

- prove di funzionamento del dispositivo nelle diverse modalità operative;
- prove sul dispositivo per verificare il rispetto dei requisiti della Norma CEI 0-21;
- prove sulle batterie al variare della temperatura in camera climatica.

Per dettagli e risultati delle prove eseguite sul dispositivo si rimanda al rapporto RdS/2013/249.

Sono state anche effettuate prove dedicate al sistema di accumulo ed al suo BMS con lo scopo di rilevare gli andamenti della tensione in funzione della capacità scaricata per diversi valori della corrente di scarica e della temperatura ambiente. La batteria al litio ferrofosfato utilizzata nelle prove era dotata di un sistema di bilanciamento delle tensioni di cella (BMS).

La Figura 64 riporta una rappresentazione schematica del circuito di prova.

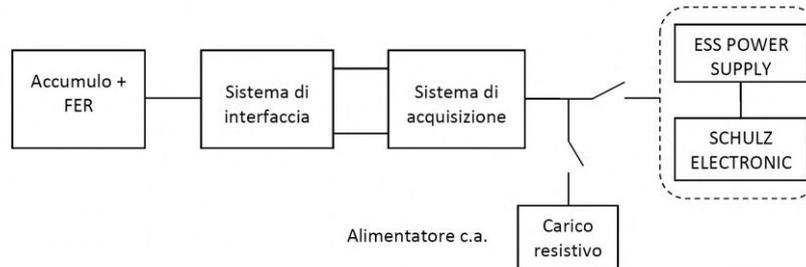


Figura 64. Rappresentazione schematica del circuito di prova della batteria

Nel seguito si riportano alcuni risultati delle prove sulla batteria al litio. Gli andamenti della tensione in funzione della capacità scaricata, per diversi valori della corrente di scarica, sono evidenziati in Figura 65.

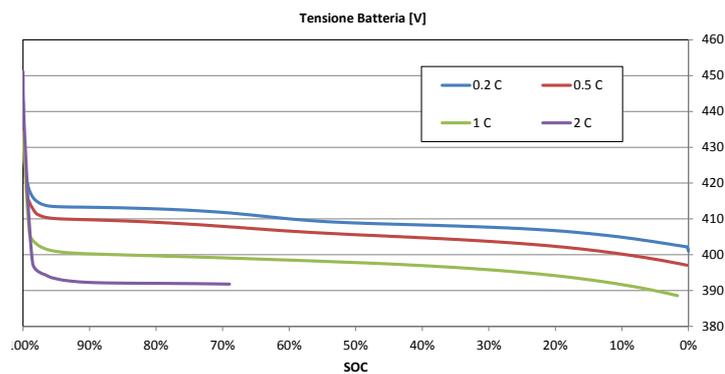


Figura 65. Andamento della tensione in funzione del SOC della batteria al variare della corrente di scarica

Dagli andamenti tracciati si evince un abbassamento del profilo di tensione al crescere del valore della corrente di scarica. Ciò è dovuto alla resistenza interna della batteria che aumenta con la corrente, comportando un abbassamento del profilo di tensione. Dal momento che il valore della tensione di fine scarica è indipendente dal regime di lavoro, ciò comporta una riduzione della capacità della batteria all'aumentare del regime di scarica, come si può osservare nei profili di tensione riportati in Figura 66. Si precisa, infine, che la prova di scarica a 2C è stata interrotta prima della scarica completa, a causa del raggiungimento del valore limite di temperatura. Gli

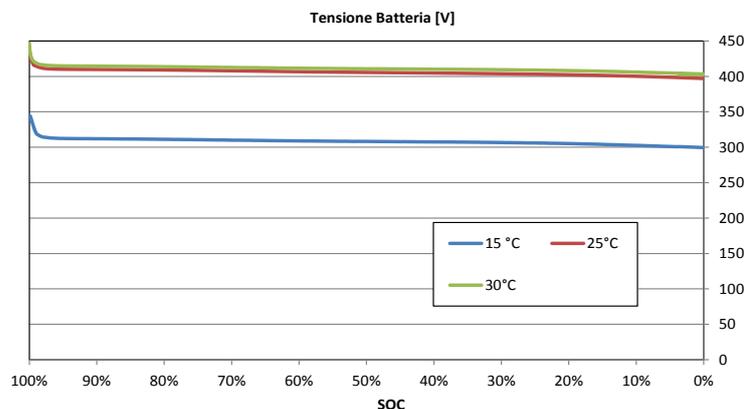


Figura 66. Andamento della tensione in funzione del SOC della batteria al variare della temperatura

andamenti della tensione in funzione della capacità scaricata, per diversi valori della temperatura ambiente sono evidenziati in Figura 66. Non è stato possibile effettuare prove in prossimità o al di sotto dei 10°C in quanto questa è la temperatura minima di funzionamento del BMS indicata dal costruttore.

È stata infine sviluppata una strategia ottimale di gestione del sistema di accumulo, in presenza di impianti alimentati da fonti rinnovabili, per tener conto degli effetti che la variabilità della generazione rinnovabile ha sulla gestione del carico elettrico nel suo complesso.

Un nuovo algoritmo è stato proposto per l'ottimizzazione del funzionamento della sorgente di accumulo secondo una logica di gestione "di massimo tornaconto economico", tale da garantire la massimizzazione del beneficio economico per l'utente finale (benefit legato al load-shifting). L'algoritmo di gestione dell'accumulo è stato semplificato rispetto alla precedente versione e posto in una forma diversa, per adattarlo alle nuove condizioni operative del sistema in esame. In particolare, sono state considerate alcune ipotesi semplificative, di seguito riassunte:

- **Prima ipotesi semplificativa.** Si assume che il sistema di accumulo compia dei cicli di carica/scarica completi. Di conseguenza lo stato di carica della batteria, durante gli intervalli di standby, potrà assumere solamente i seguenti due valori:
 - SOC=10% (storage completamente scarico);
 - SOC=100% (storage completamente carico).

Il soddisfacimento di tale ipotesi semplificativa presuppone la scelta di un adeguato criterio di dimensionamento per lo storage. In particolare, se l'accumulo viene dimensionato per una frazione del carico assorbito dall'utente, la condizione sopra esplicitata sarà sempre soddisfatta.

- **Seconda ipotesi semplificativa**
 - Si suppone che la batteria impieghi un'ora per caricarsi/scaricarsi completamente, quindi: durata di scarica/carica = 1 h.
 - Non sono pertanto ammessi intervalli di carica/scarica consecutivi (un intervallo di carica è sempre alternato ad un intervallo di scarica, e viceversa).

Uno dei risultati della validazione dell'algoritmo è illustrata nel diagramma di carico equivalente di Figura 67 dove si nota, che la prima ipotesi semplificativa dell'algoritmo di gestione dell'accumulo (batteria dimensionata per una frazione del carico assorbito dall'utente) non è, in realtà, soddisfatta (l'accumulo impegna una potenza pari a 16 kW, contro un picco massimo del diagramma di carico pari a circa 30 kW). Ciò è dovuto al fatto che, diversamente da quanto inizialmente preventivato, non è stato possibile in questa fase testare il dispositivo di conversione nei pressi l'Università di Palermo, per ragioni sia tecniche che logistiche, e ciò ha comportato un sovradimensionamento del dispositivo di accumulo rispetto al carico assorbito dall'utenza.

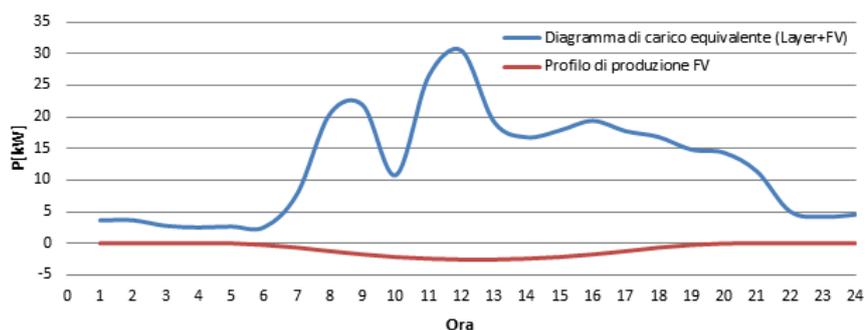


Figura 67. Diagramma di carico "equivalente" della LAYER (in blu) e profilo di generazione dall'impianto FV (in rosso), per il giorno di riferimento

La Figura 68 evidenzia come si modifica il diagramma di carico della LAYER per effetto dei cicli di carica/scarica del dispositivo di accumulo.

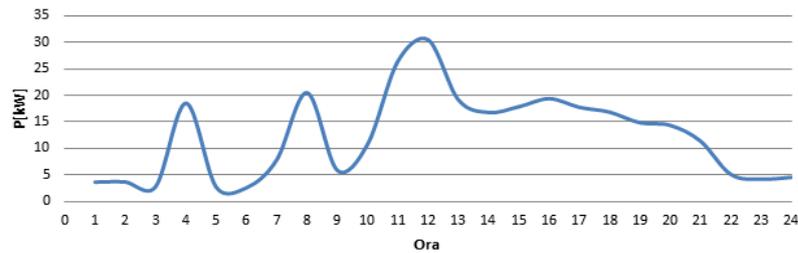


Figura 68. Diagramma di carico risultante della LAYER, considerando operativo il dispositivo di accumulo

Se confrontato con il diagramma di carico equivalente di Figura 67, si nota la presenza di un ulteriore picco di potenza tra le 3:00 e le 4:00, dovuto all'energia assorbita dalla batteria durante il processo di carica, ed una riduzione della potenza assorbita tra le 8:00 e le 9:00, dovuta all'energia rilasciata dalla batteria durante il processo di scarica.

Con delle ipotesi generali di costo dell'energia elettrica sul mercato elettrico, è stato, infine, calcolato il risparmio giornaliero sul costo della bolletta elettrica derivante dal funzionamento dell'accumulo secondo logiche di load-shifting: 0,731 €/giorno.

In conclusione, i risultati dei test effettuati hanno confermato l'efficace funzionalità del dispositivo di interfaccia del sistema di accumulo con batterie al litio con rete elettrica in presenza di un impianto fotovoltaico di dimensioni adeguate. Le valutazioni economiche condotte, immaginando di basare il controllo delle batterie su logiche di load-shifting, pur avendo un valore puramente indicativo per le ipotesi assunte, rilevano vantaggi economici comunque abbastanza contenuti. Si conferma, ancora una volta, la necessità di prevedere nell'attuale quadro regolatorio un adeguato sistema di remunerazione dei servizi "di sistema" che un dispositivo ibrido accumulo/FER può rendere alla rete, al fine di giustificarne l'adozione e lo sviluppo.

Analisi della sicurezza delle batterie al litio

Le attività sperimentali sulle batterie al litio sono state continuamente sostenute da una valutazione dei problemi di sicurezza associati. Si è proseguito nell'aggiornamento delle informazioni precedentemente raccolte nella *Safety Review* per un sistema di accumulo stazionario. In particolare sono state raccolte le norme tecniche CEI e IEC, in vigore e *in progress*, riguardanti: batterie ed accumulatori, sicurezza ed affidabilità di componenti elettrici ed elettronici, prestazioni, trasporto e stoccaggio di batterie ed accumulatori, autorimesse e autofficine, infrastrutture di ricarica.

Questa attività consente di entrare in possesso delle informazioni necessarie all'installazione in sicurezza di sistemi di accumulo stazionario realizzati nei laboratori ENEA e di programmare anche prove di abuso. Inoltre, si stanno raccogliendo informazioni sugli studi di sicurezza condotti negli USA da NFPA, NREL e SANDIA Laboratories.

Per quanto riguarda le tecnologie dell'accumulo di energia per le reti elettriche, utilizzando lo schema di *Safety Review* sono state raccolte informazioni anche su altri sistemi di accumulo con un'analisi preliminare della casistica incidentale.

c. Studio e sviluppo di metodi di accumulo alternativi a quelli al litio-ione

I sistemi di accumulo elettrico alternativi a quelli con batterie litio-ione iniziano ad avere interessanti prospettive industriali, seppur rimangano ancora rilevanti i limiti scientifici e tecnologici che devono essere necessariamente risolti.

Nuove attività di ricerca sono state avviate, in via esplorativa, su sistemi metallo-aria e su sistemi redox a flusso. La scelta è motivata dall'enorme crescita delle prestazioni che si prevede possano ottenersi con i sistemi metallo-aria, mentre le batterie redox a flusso, nonostante abbiano avuto alterne fortune, presentano interessanti potenzialità in termini di costi ed applicabilità alle reti elettriche. Pertanto le attività svolte hanno riguardato una prima valutazione dei materiali più innovativi ed originali in grado di affrontare i principali problemi incontrati nello sviluppo di questi nuovi sistemi di accumulo, con particolare attenzione alla membrana delle celle redox ed all'elettrodo gassoso e a metalli più promettenti delle celle metallo-aria.

Relativamente all'uso dell'idrogeno, l'attività si è concentrata sull'analisi di fattibilità comparativa di diversi metodi di accumulo dell'energia elettrica utilizzando l'idrogeno, in alternativa e per confronto con le batterie (per esempio, quali quelle redox a flusso in qualche misura già utilizzate), con lo scopo di valutarne la convenienza sia

tecnica che economica. Questa posizione sull'idrogeno è sostanzialmente condivisa dalla Commissione Europea che il 10 luglio 2013, nella proposta di regolamentazione relativa al nuovo partenariato sull'idrogeno e le celle a combustibile (JU FCH, 2014-2024), ha indicato tra gli obiettivi prioritari: *“demonstrate on a large scale the feasibility of using hydrogen to support integration of renewable energy sources into the energy systems, including through its use as a competitive energy storage medium for electricity produced from renewable energy sources”*.

Il programma di lavoro è stato svolto quasi esclusivamente dall'ENEA, con un contributo dell'Università di Camerino sulle batterie redox al vanadio, anche alla luce degli interessi industriali individuati in due aziende nazionali su questa tecnologia di accumulo.

L'Università di Camerino (Scuola di Scienze e Tecnologie) ha collaborato con ENEA per l'analisi sperimentale del comportamento di celle prototipali, fornite gratuitamente dal Gruppo Lorcioni, per lo sviluppo di un modello puntuale della cella che permetta in ogni momento di intervenire sulle condizioni di esercizio del sistema attraverso un monitoraggio puntuale delle concentrazioni delle specie interessate.

Presso i laboratori ENEA sono state svolte le seguenti attività:

1. studio dei sistemi redox a flusso in collaborazione con l'Università di Camerino;
2. analisi dei materiali e delle prospettive dei sistemi metallo-aria;
3. studio e analisi dell'applicabilità dei sistemi di accumulo in reti tranviarie in collaborazione con l'Università di Pisa (DESTEC);
4. analisi comparativa tecnica ed economica dell'accumulo dell'idrogeno rispetto alle batterie redox a flusso.

Studio dei sistemi redox a flusso

L'ENEA ha condotto una ricerca sui sistemi redox a flusso, partendo dalla valutazione dello state dell'arte della tecnologia ed individuando le principali coppie redox impiegate e le strategie costruttive utilizzate per la realizzazione di tali sistemi [rapporto RdS/2013/252]. L'attenzione si è concentrata sui sistemi redox al vanadio con celle a membrana protonica.

Sono state eseguite delle valutazioni sugli elettrodi da usarsi in sistemi redox a flusso al vanadio. Con tali elettrodi è stato realizzato un sistema completo con il quale sono state effettuate delle prove preliminari per valutarne le prestazioni e tratte le prime conclusioni sulle potenzialità di questa tecnologia di accumulo.

Stato della tecnologia delle batterie redox a flusso

Le moderne batterie a flusso sono costituite generalmente da due semicelle, una anodica e l'altra catodica, separate tra loro da una membrana in cui sono pompate simultaneamente i due elettroliti (Figura 69). Durante la fase di carica l'energia elettrica fornita viene utilizzata per far avvenire una reazione di riduzione in uno dei due elettroliti e una reazione di ossidazione nell'altro. La membrana tra le due semicelle previene fenomeni di mescolamento dei due elettroliti e contemporaneamente permette il passaggio selettivo degli ioni coinvolti nelle reazioni redox. Durante la fase di scarica l'energia chimica contenuta negli elettroliti è rilasciata durante la reazione inversa e l'energia elettrica può essere raccolta dal sistema. Durante la fase operativa l'elettrolita viene continuamente pompato nel circuito di circolazione tra reattore e serbatoi.

La ricerca scientifica riguardante le batterie redox a flusso iniziò negli anni settanta quando il concetto di un sistema di accumulo elettrochimico basato su una cella redox a flusso venne presentato da Thaller. Inizialmente gli studi furono rivolti alla coppia redox Fe-Ti che utilizzava come agente ossidante il FeCl_3 e come agente riducente il TiCl_2 , entrambi in elettrolita alcalino. In seguito il Ti^{2+} venne sostituito dal Cr^{2+} per ottenere prestazioni migliori.

Ulteriori progressi furono fatti nel 1973 dai ricercatori della NASA nell'ambito di un progetto su sistemi di accumulo fotovoltaici per ipotetiche basi lunari. Essi svilupparono una batteria redox a flusso basata sul sistema Fe-Cr arrivando a costruire un dispositivo da 10 kW. I sistemi Fe-Cr soffrono però di diversi problemi che ne limitano una più ampia diffusione e disponibilità commerciale, tra questi: condizioni operative severe (alte

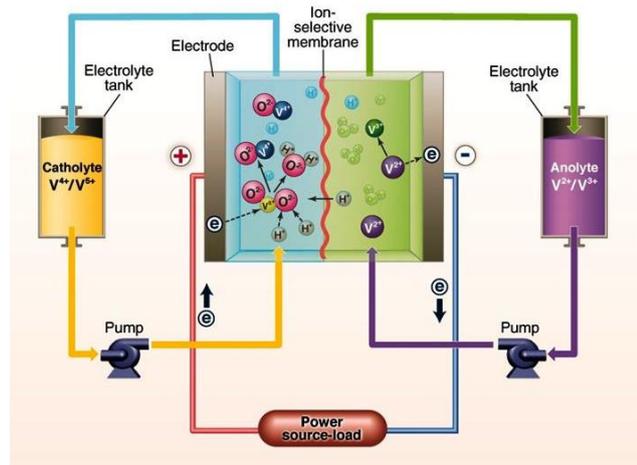


Figura 69. Schema dei componenti di una batteria redox a flusso al vanadio (Fonte: www.sciencemag.org)

temperature e ad alte pressioni), materiali tossici e costosi, l'utilizzo di due elettroliti differenti nelle semicelle anodica e catodica che causa una progressiva contaminazione durante la vita operativa della cella e una frequente manutenzione per evitare l'intasarsi della membrana.

Questi limiti vennero in parte superati con l'invenzione delle batterie redox a flusso *All-Vanadium* all'Università del New South Wales (UNSW) nel 1984. Uno dei principali vantaggi dei sistemi *All-Vanadium* è l'uso del vanadio sia nell'elettrolita catodico che in quello anodico. Questa caratteristica previene la contaminazione attraverso la membrana facendo in modo da riutilizzare continuamente l'elettrolita.

Anche se precedentemente si era ipotizzato l'uso di coppie redox del vanadio, ciò sembrava impraticabile a causa della bassissima solubilità dei composti di V(V) per i quali si ottenevano concentrazioni nell'elettrolita minori di 0,5 mol/L che ne impedivano un uso pratico. La svolta avvenne quando l'UNSW scoprì che alte concentrazioni di V(V) potevano essere preparate in acido solforico per via elettrochimica da V(IV). Inizialmente l'UNSW lavorò sullo sviluppo di diversi prototipi da 1-4 kW per applicazioni stazionarie e veicoli elettrici ma il punto di svolta nello studio delle batterie *All-Vanadium* fu lo sviluppo di processi a basso costo per la produzione elettrochimica di vanadio da ossido di vanadio *raw material*.

Negli anni altre tipologie di batterie redox a flusso sono state oggetto di ricerca come le Zn-Ce e le Zn-Br (anche chiamate batterie ibride a flusso) e le batterie redox a flusso con elettroliti non acquosi. Tra tutti i sistemi sviluppati finora solamente le polisolfuro-Br e le *All-vanadium* hanno però mostrato potenzialità per una possibile commercializzazione.

Come mostrato nella Tabella 12 la densità di potenza complessiva rimane bassa se confrontata con le batterie a piombo acido o a ioni litio, poiché il volume dei prodotti/reagenti liquidi è molto più alto.

Tabella 12. Confronto tra diverse tipologie di batterie redox a flusso

Batteria redox	Densità di energia (Wh/L)	Densità di potenza (W/L)
Bromo-polisolfuro	20-35	60
Vanadio-vanadio	20-35	60-100
Vanadio-bromo	20-35	50
Zinco-bromo	20-35	40
Zinco-cerio	20-35	50

E' emerso che le batterie redox a flusso hanno le potenzialità per assumere un ruolo critico nel futuro del consumo e conservazione eco-consapevole dell'energia. Inoltre, a causa della loro notevole flessibilità di design, tali batterie si prestano ad accumulare notevoli quantità di energia con un costo decisamente contenuto. Il loro impiego come sistemi di accumulo dell'energia in apparati di generazione intermittenti, come quelli basati sull'energia eolica e solare, determina un miglioramento della stabilità e dell'efficienza complessiva della rete energetica.

Tra la svariate specie chimiche impiegate nei sistemi di batterie redox a flusso, quella basata sulla coppia redox vanadio/vanadio è quella che ha attirato maggior attenzione per la relativa sicurezza e il basso rischio di contaminazione derivante da effetti di *crossover* tra i compartimenti elettrodi. Affinché le batterie redox a flusso possano trovare un posto di rilievo in campo commerciale, è fondamentale che i costi e i benefici associati con l'acquisto e il mantenimento di un tale sistema siano molto contenuti. Una possibilità per ridurre l'iniziale spesa affrontata per la costruzione dello *stack*, in attesa che vengano sviluppati nuovi materiali efficienti e a basso costo, è quella di migliorare le prestazioni generali delle celle. L'ottimizzazione delle prestazioni di cella permetterebbe una riduzione delle dimensioni dello *stack* e, di conseguenza, una diminuzione dei costi necessari per soddisfare le stesse esigenze energetiche.

Recentemente, è stata descritta una batterie redox a flusso con una densità di potenza di picco di 557 mW cm⁻², che è più di cinque volte superiore a quella di altri sistemi. Questa densità di potenza è stata ottenuta con un'architettura a serpentina per la distribuzione dell'elettrolita, simile a quella adottata nelle celle a combustibile con elettrodi di carbon-paper. La configurazione ad elettrodi sottili di carbon-paper riduce l'insorgenza di resistenze ohmiche nella cella perché permette un migliore contatto tra tutti i componenti, e consente minori distanze di trasferimento di carica attraverso la cella. Inoltre, la presenza di un canale di flusso a serpentina migliora notevolmente il trasferimento di massa nell'elettrodo poroso, partendo dalla distribuzione dell'elettrolita attraverso l'elettrodo per arrivare a coprire l'intera superficie della membrana. Tuttavia, sono attesi ulteriori margini di guadagno che possono essere attuati attraverso un disegno ed un'architettura avanzata o tramite un miglioramento dell'ingegneria dei materiali.

Ad esempio, è stato sviluppato con successo un metodo di pretrattamento termico per aumentare l'area elettrochimicamente attiva di un feltro di grafite, un materiale tradizionalmente utilizzato nei sistemi di batterie redox a flusso. L'aumento dell'attività registrata è stato attribuito alla funzionalizzazione della superficie tramite la formazione di gruppi carbossilici, che sono stati ritenuti fondamentali per catalizzare la reazione di ossido-riduzione ($\text{VO}^{2+} / \text{VO}_2^+$) nel compartimento catodico. Ad oggi, questi risultati non sono stati confermati sul carbon-paper, un materiale che si è dimostrato necessario per il raggiungimento di elevate potenze.

Un'altra possibilità per aumentare le prestazioni delle batterie redox a flusso è quella di migliorare le proprietà di trasporto delle membrane a scambio protonico. Infatti le resistenze al trasferimento di massa causate dalla membrana contribuiscono notevolmente alle perdite ohmiche che si evidenziano in tali batterie. Le membrane, generalmente utilizzate riportate in letteratura, sono a base di acido perfluorosolfonico (PFSA, Nafion) e questo principalmente per l'elevata stabilità e conducibilità ionica esibite da questo materiale. Membrane a scambio cationico di costo inferiore a quello del Nafion o la sostituzione delle membrane cationiche con membrane anioniche rappresentano due interessanti filoni di ricerca per aumentare l'efficienza e/o diminuire i costi del sistema.

Attività sperimentali e risultati

Per l'effettuazione delle prove è stata progettata e realizzata una cella singola a diffusione simile a quella adottata nelle celle a combustibile, fornita di elettrodi di carbon-paper interposti tra la membrana e il portacorrente, una membrana di Nafion 117, due distributori della soluzione elettrolitica (piastre in grafite) e i collettori di corrente in acciaio inossidabile.

Uno spaccato della configurazione di cella è mostrato in Figura 70. Sono stati utilizzati diversi strati di carbon-paper su entrambi i lati della cella per adeguare lo spessore dell'elettrodo a quello della guarnizione sigillante (gasket). Sulle piastre di grafite è incisa la serpentina in grado di creare un percorso preferenziale per il flusso dell'elettrolita e facilitare la distribuzione dello stesso all'interno degli elettrodi. Le piastre di grafite sono state montate a sandwich tra i collettori di corrente.

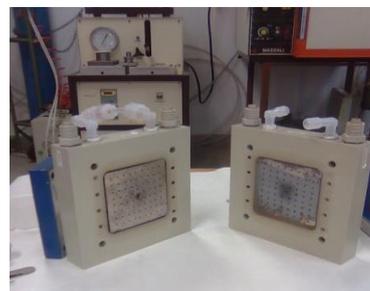
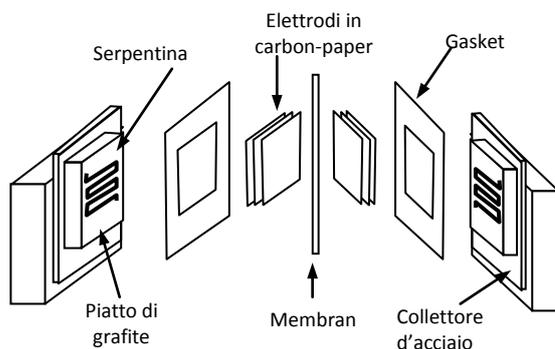


Figura 70. Cella utilizzata per le misure

Prima di essere usate per assemblare la cella, le membrane sono state pretrattate in acqua distillata a 80 °C e in una soluzione 1 M di H_2SO_4 a 80 °C per 30 minuti ciascuno. L'elettrolita è stato preparato sciogliendo il $\text{VO}_2\text{SO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (20,87% in peso di vanadio, il 99,9% di purezza) in una soluzione 5 molare di acido solforico (H_2SO_4) in modo da avere una concentrazione finale di vanadio pari a 0,26 o 0,5 mol/L.

In Figura 71 è riportata una voltammetria ciclica (CV) eseguita su elettrodi di carbon paper. La curva in rosso è quella ottenuta utilizzando solo la soluzione contenente l'elettrolita di supporto (H_2SO_4), mentre la curva in nero è quella ottenuta dopo che all'elettrolita di supporto è stato aggiunto ossido di vanadio. Si può osservare come nel primo caso si abbia un trascurabile passaggio di corrente (inferiore a $0,0025 \text{ mA cm}^{-2}$) sia in ossidazione che in riduzione per potenziali di scarica di -0,3 V e 2,0 V (calcolati rispetto ad un elettrodo ad idrogeno in condizioni normali, NHE), rispettivamente. L'aggiunta di ossido di vanadio fino ad ottenere una soluzione 0,5 N di vanadio, determina un deciso aumento della corrente in catodica, che si porta a -0,3 V a circa $0,08 \text{ mA cm}^{-2}$.

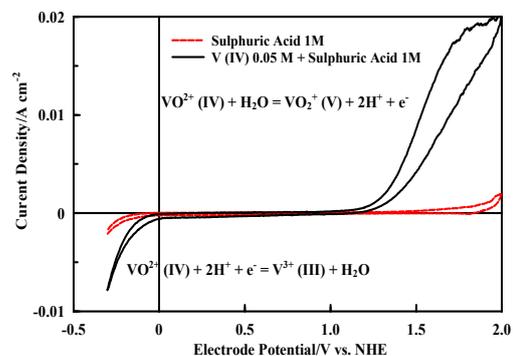


Figura 71. CV a 30 mV/s su elettrodo di carbon paper in presenza (curva nera) ed in assenza (curva rossa) di ossido di vanadio

In Figura 72 è mostrata la voltammetria ciclica (CV) eseguita su elettrodi di titanio. Su questo tipo di elettrodi si osserva un'elevata sovratensione sia nei confronti della reazione di ossidoriduzione dell'acqua, sia nei confronti dell'ossido-riduzione del vanadio ossido. Come conseguenza le correnti anodiche e catodiche in presenza del solo elettrolita di supporto sono praticamente trascurabili.

Quando all'elettrolita di supporto si aggiunge l'ossido di vanadio, mentre la corrente di ossidazione resta trascurabile, si osserva l'insorgenza di una leggera corrente di riduzione. Il valore di tale corrente è comunque basso e tale da non poter essere sfruttata a fini applicativi. In conclusione possiamo affermare che l'unico elettrodo capace di favorire la reazione di ossidoriduzione dell'ossido di vanadio è il carbon paper. Le ulteriori prove in cella sono state effettuate con questo materiale.

La Figura 73 riporta l'andamento della corrente di scarica registrata in seguito ad una carica a potenziale costante eseguita a 1,5 V per 45 minuti. La corrente è rimasta praticamente costante ad un valore compreso tra 28 e 21 mA cm² per tutto il tempo dell'esperimento. Durante la prova si è osservato che il colore della soluzione elettrolitica sul lato anodico, che di partenza era verde scuro, si schiariva passando per un verde chiaro per poi colorarsi di un giallo pallido alla fine dell'esperimento. Questa variazione di colore è indice che la reazione di ossidazione del Vanadio (IV) a Vanadio (V) è stata completata. La colorazione sul lato catodico al contrario diventa sempre più scura indice del fatto che il Vanadio (IV) era stato ridotto a Vanadio (III) o altre specie più ridotte quale Vanadio (II).

Con una corrente costante e pari a 200 mA, il processo di carica è durato mediamente 12 minuti mentre la scarica ha impiegato circa 35 minuti. Considerando le correnti, la capacità accumulata è stata di 40 mAh mentre quella restituita è stata di circa di 30 mAh. L'efficienza faradica del processo è stata del 75%. Considerando le tensioni medie l'energia accumulata è stata di 73 mWh, mentre quella restituita di soli 4,5 mWh per cui l'efficienza energetica è appena del 6%.

Un andamento simile è stato osservato caricando la cella a 100 mA. L'isteresi osservata in questa occasione è di 1,38 V, a cui corrisponde una caduta ohmica di 9 ohm, superiore a quella calcolata a più alta corrente. L'isteresi di tensione è difficilmente spiegabile in termini di resistenza di polarizzazione in quanto le misure precedentemente effettuate davano per la cella una resistenza molto bassa. La tensione di fine carica in questo caso è stata impostata a 1,8 V mentre quella di fine scarica era sempre 0,0 V. La tensione media di carica era di circa 1,6 V. La tensione media di scarica era di circa 0,20 V. Il processo di carica è durato mediamente 41 minuti, mentre la scarica ha impiegato circa 50 minuti. Considerando le correnti, la capacità accumulata è stata di 68 mAh mentre quella restituita è stata di circa di 41 mAh. L'efficienza faradica del processo è stata del 60%. Considerando le tensioni medie, l'energia accumulata è stata di 109 mWh mentre quella restituita di soli 8,2 mWh, per cui l'efficienza energetica è appena del 7,5%.

Conclusioni

Da questi risultati preliminari emerge che la diffusione delle batterie redox a flusso è limitata a causa di molte barriere tecniche, nonostante ci sia un'ampia e crescente opportunità di mercato ed alcuni sistemi siano già offerti da qualche azienda straniera. Infatti, tra i diversi metodi di accumulo, quello basato sui sistemi a flusso rimane uno dei pochi in grado di gestire l'enorme fattore di carico derivanti dai generatori di potenza. Inoltre, a causa del sempre maggior impiego di risorse rinnovabili, i sistemi a flusso sono tra i pochi capaci sia di ridurre le intermittenze tipiche di tali risorse energetiche sia di sopperirne la mancanza di disponibilità. Queste applicazioni di *utility-scale* renderanno necessario un accumulo energetico di dimensioni del megawatt caratterizzate da un ciclo di vita, da una rapida carica/scarica e da una modularità per le quali altre tipologie di batterie non sono utilizzabili.

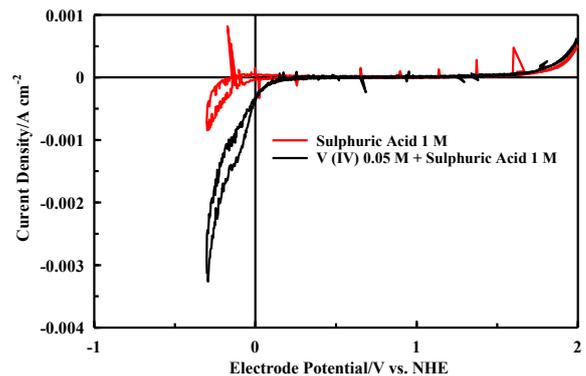


Figura 72. CV a 30 mV/sec su elettrodo di titanio in presenza (curva nera) ed in assenza (curva rossa) di ossido di vanadio

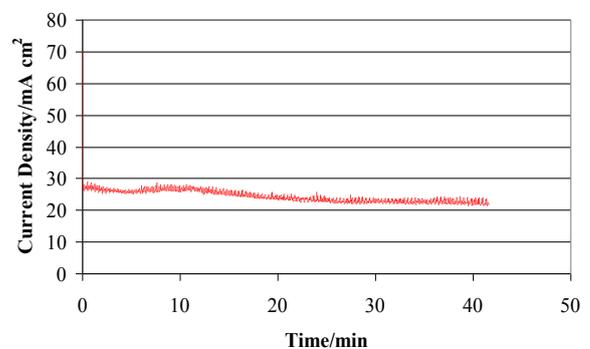


Figura 73. Andamento della corrente durante una carica potenziostatica utilizzando 10 mL di soluzione flussata contenente 0,26 M di V⁴⁺ in H₂SO₄ 5 M

Un aumento della densità energetica potrà essere gradualmente ottenuto attraverso innovazioni sequenziali, sia a livello di materiali che di sistema. La ricerca su materiali elettrodi, ad esempio materiali porosi tridimensionali con proprietà catalitiche ottimizzate, potrà determinare un aumento significativo della potenza in uscita per una determinata area elettrodica. L'identificazione di coppie redox stabili che hanno un'alta solubilità così come un alto potenziale di cella nell'intervallo di temperatura desiderato, potrà garantire un aumento della energia accumulata.

Ulteriori studi sulla progettazione sia delle celle che dei sistemi potranno portare a miglioramenti delle prestazioni globali in termini di efficienza energetica e faradica. L'obiettivo principale a livello delle singole celle è quello di minimizzare le perdite nel pompaggio e diminuire i costi dei materiali che costituiscono il pacchetto membrana/elettrodo. A livello di apparato sarà inoltre necessario dotare la cella di un sistema di controllo per l'integrazione nella rete, in modo da ottimizzare la gestione della potenza.

Studi di base sulla batteria redox Vanadio/Vanadio

Attività di ricerca indirizzate allo sviluppo di modelli per la gestione della batteria Vanadio/Vanadio che sfrutta le coppie redox V(III)/V(II) e V(V)/V(IV) in soluzioni concentrate di H₂SO₄ rispettivamente all'anodo e al catodo, sono state svolte nell'ambito della collaborazione con l'Università di Camerino.

Nelle batterie redox a flusso i reattivi, costituiti da coppie redox in soluzione acquosa, sono fatti circolare da pompe in un elettrolizzatore costituito da celle elettrochimiche in serie dove i compartimenti anodico e catodico sono separati da membrane a conduzione cationica o anionica che impediscono il contatto diretto dei reattivi.

I problemi di gestione della batteria Vanadio/Vanadio sono legati essenzialmente a due fenomeni che concorrono al sbilanciare la cella durante il funzionamento. Ambedue i fenomeni, cross-over degli ioni e eletto-osmosi di acqua, sono legati alla presenza della membrana. Il cross-over, che dipende dalla selettività della membrana rispetto agli ioni presenti in soluzione, determina trasferimento di ioni fra le semicelle con conseguente perdita di capacità. Il trasferimento di acqua, causato dal campo elettrico e dalle differenze di forza ionica, produce variazioni di concentrazione ed eventuale precipitazione di sali quando sono superati i limiti di solubilità. I due processi sono reversibili perché, essendo il sistema chiuso, le condizioni iniziali di equilibrio possono essere ripristinate mediante rimescolamento delle soluzioni. Altri processi come lo sviluppo d'idrogeno all'anodo causato da overcharge, sono irreversibili e richiedono una correzione per via chimica od elettrochimica.

Una corretta gestione della batteria richiede pertanto lo sviluppo di metodi affidabili di monitoraggio delle concentrazioni. In questo quadro è stato sviluppato un test elettrochimico basato su elettrolisi a potenziale controllato in strato sottile per la determinazione coulometrica sia della concentrazione che dello stato di ossidazione formale del vanadio che utilizza le soluzioni elettrolitiche tal quali senza necessità di ricorrere a diluizioni. E' stato inoltre messo a punto un sistema per correlare il potenziale a circuito aperto (OCV) con lo stato di carica che utilizza la spettroscopia UV-Visibile ottenendo risultati accettabili per l'elettrolita anodico. Sono state infine eseguite prove di carica e scarica utilizzando una batteria a dieci elementi, potenziale formale 12,5 V, fornita dalla Ditta AEA-Locconi.

L'attività svolta è ampiamente descritta nel rapporto RdS/2013/253.

Batterie metallo-aria: stato dell'arte e prospettive

L'alta densità energetica delle batterie metallo-aria rappresenta una risorsa energetica promettente per le applicazioni dell'accumulo di grandi quantità di energia in volumi e masse limitate. La batteria è basata su anodo metallico e un catodo a ossigeno atmosferico (aria). Poiché l'ossigeno è fornito dall'esterno, la maggior parte dell'interno della batteria può essere destinata all'alloggiamento dell'anodo, e questo permette di ottenere elevate capacità specifiche (l'energia specifica e quella volumetrica possono raggiungere più di 500 Wh/kg e 1000 Wh/L rispettivamente). Caratteristiche desiderabili per l'elettrodo negativo sono un potenziale redox negativo o un forte potere riducente, basso peso molecolare, ed una grande variazione di valenza durante la scarica. Candidati promettenti come elettrodi negativi includono litio, alluminio, magnesio, zinco e ferro.

l'ENEA ha svolto un'accurata analisi e valutazione di tipo tecnico dei principali sistemi di accumulo ricaricabili del tipo metallo-aria. L'analisi parte dalla rassegna dei principali catalizzatori utilizzati nei sistemi metallo-aria per la reazione di ossidoriduzione dell'ossigeno. In particolare vengono analizzati i metalli nobili e le loro leghe, gli elettrodi a base carboniosa, quelli contenenti gli ossidi dei metalli di transizione ed infine i sistemi misti organico-inorganici. Successivamente si è passati ad analizzare i principali tipi di batterie ricaricabili metallo-aria, ed in particolare batterie contenenti ferro, zinco e litio. Quest'ultimo tipo di batteria è stato ulteriormente analizzato andando a prendere in considerazione i vari tipi di elettroliti, il meccanismo di reazione e i problemi legati alla

degradazione dell'anodo di litio metallico. In definitiva l'analisi effettuata pone le basi per l'inizio di uno studio più accurato sui sistemi di accumulo metallo-aria ed in particolare sui sistemi litio-aria che, al momento rappresentano l'ultima frontiera nel campo dei sistemi a più alta densità di energia.

Sebbene le batterie metallo-aria, e quelle litio-aria ricaricabili in particolare, sembrano estremamente promettenti, restano molte questioni scientifiche e tecnologiche irrisolte che vanno affrontate prima che questi sistemi diventino realmente commercializzabili.

Costi e benefici sull'introduzione di sistemi di accumulo ad Idrogeno e flow battery

L'ENEA, per meglio indirizzare le scelte su metodi di accumulo alternativi al litio-ione, ha svolto un'analisi costi e benefici relativa a due sistemi di accumulo di energia: le batterie a flusso e l'idrogeno (come accumulo chimico). Per il primo sistema, dopo un esame dello stato dell'arte, si è eseguito un confronto di costo ed ingombro per un caso specifico tra un sistema redox ed uno al litio, per il secondo è stata eseguita una progettazione tecnica di massima. Si è poi valutata la possibilità di installazione dei due sistemi in un nodo della rete elettrica Italiana e si è calcolato il margine di guadagno annuale per il gestore degli stessi ed i benefici apportati dai due sistemi in termini di mancato adeguamento in potenza della rete di trasmissione [rapporto RdS/2013/255].

Applicazioni delle redox a flusso e confronto economico con le batterie al litio

La Tabella 13 riporta le caratteristiche di alcune batterie redox al vanadio (VRB) realizzate nel periodo 1988/2008.

Tabella 13. Prestazioni di sistemi redox al vanadio su una scala di 1 kW-1MW³

Autori/anno	Rendimento elettrico	Potenza	Energia	Nazione	Ente/Società
Rychcik, Skyllas-Kazacos (1988)	Non noto	1 kW	5 kWh	Australia	Australian Department of Resources and Energy
Skyllas-Kazacos et al. (1991)	72–90%	1,33 kW	0,7 kW h (40–42 A h)	Australia	Australian National Energy Research Development Council, NSW Department of Minerals & Energy and Mount Resources Ltd.
Largent et al. (1993)	Non noto	1,6–5 kW	12 kWh	Australia	Australia Research Council, Pacific Power, NSW Office of Energy and Thai Gypsum Co. Ltd.
Skyllas-Kazacos and Menictas (1997)	>80%	1–3 kW	Non noto	Australia	Unisearch Ltd.
Itoh et al. and Tokuda et al. (1999 and 2000, respectively)	$\eta_E = 80\%$ 80–85% $\eta_{system} = 80-85\%$ 75–82% $\eta_{system} = 70\%$	≈20 kW 50 kW 450 kW	≈10 kWh (0,5 h) 175–400 kWh 900 kWh (2 h)	Giappone	Sumitomo Electric Ltd. , Kansai Electric Power Co., Inc.
Shibata and Sato (1999)	Non noto	200 kW	800 kWh (4 h)	Giappone	Kashima-Kita Electric Power Corp.
Miyake, Tokuda (2001)	Non noto	Non noto	30–3 MWh	Giappone	Sumitomo Electric Ltd. , Kansai Electric Power Co., Inc.
Varie batterie commerciali (2002)	Non noto	10 to 50 kW	Non noto	Tailandia	Cellennium (Thailand) Company Ltd.
Hawkins, Robbins (2002)	82–85%	250 kW	520 kWh	Australia/Canada	Telepower Australia Pty. and Vantack (VRB) Technology Corp.
Shigematsu et al. (2002)	Non noto	1.5–3MW	3600–7200 MWh	Giappone	Sumitomo Electric Ltd.
Shinzato et al. (2002)	Non noto	170–275 kW	Non noto		
Skyllas-Kazacos (2002)	Non noto	Non noto	3,9 kWh	Australia	Non noto
Schreiber et al. (2005)	Non noto	1 kW	50 kWh	Austria	ASFINAG (Austrian Motor and Expressway Operator)
Zhao et al. (2006)	77–78% 80–82%	≈1kW (0,7–1,4 kW) ≈10 kW (5–10 kW)	Non noto 0,1 Wh cm ⁻²	Cina	National 863 Programme
Huang et al. (2008)	Non noto	0,25–0,9 kW	24 Wh dm ⁻³		
Varie batterie commerciali	Non noto	80–150 W kg ⁻¹ elettrolita	2,5–10 MWh	Canada	VRB Power Systems Inc.

³ G. Kear, A.I.A. Shah, F. C. Walsh "Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects" International Journal of Energy Research - Int. J. Energy Res. 2012; 36:1105–1120

Dalla tabella si evince che dal 1999 sono stati realizzati sistemi di grande potenza (20 kW - 3 MW) e capacità (7200 MWh), il rendimento di questi sistemi è nell'ordine del 77-85%.

Allo stato di diffusione attuale della tecnologia i produttori di batterie a flusso tendono a sviluppare soluzioni personalizzate per l'utente costruite in parte assemblando in serie o in parallelo moduli 'standard' ed in parte realizzando prodotti su misura per specifiche applicazioni, in generale i produttori tendono a non fornire in catalogo tutte le caratteristiche elettriche, di ingombro e peso dei loro moduli standard ma si riservano di fornire informazioni direttamente all'acquirente

L'interesse per un sistema di accumulo è legato sia alle sue caratteristiche fisicochimiche, come la potenza e l'energia specifica, la durata di vita e la dinamica, sia ai suoi costi di realizzazione e manutenzione. Per confrontare diverse tecnologie sarebbe corretto confrontarne anche i costi, i quali comprendono sia l'investimento iniziale che quello legato alla manutenzione, quelli del sistema che supporta la parte elettrochimica, come ad es. l'elettronica di contenitori, le pompe di circolazione ed i sistemi di raffreddamento, ed infine quelli legati all'elettronica di potenza.

Purtroppo nel caso delle batterie a flusso, che non hanno ancora una diffusione paragonabile a quella di altre tecnologie (es. le batterie al litio), le informazioni sui costi sono difficilmente reperibili, i produttori preferiscono infatti proporre non l'acquisto del solo sistema di accumulo, ma uno studio completo di una soluzione ad hoc per il cliente, che comprenda anche l'individuazione delle aree dove installare la batteria, del tipo di inverter, del ciclo di lavoro, ecc..

Nello studio si fa quindi riferimento ad un impianto di accumulo a batterie a flusso, finanziato da Department of Energy, che si sta realizzando a Painesville (Ohio) negli Stati Uniti⁴. Si tratta di un impianto, costituito da batterie redox al vanadio della potenza di 1,28 MW e dell'energia di 8.96 MWh, per il quale sono reperibili informazioni sui costi di produzione dei singoli componenti del sistema.

Sono stati confrontati costi ed ingombri di un sistema redox con quelli di un equivalente sistema di accumulo al litio. A parità di potenza ed energia accumulate, il costo del sistema redox è calcolato in 3757 k€, mentre quello al litio è di 5180 k€, senza conteggiare il costo dei bus di collegamento tra i contenitori, che dipende dalla geometria dell'ambiente in cui verranno installati. Se per il sistema redox si parla di un prodotto su misura per una determinata applicazione ed ancora allo stato prototipale, nel caso del litio possono scendere in breve tempo soprattutto i costi dei contenitori, mentre quelli delle celle andrebbero visti in una produzione in altissima serie, i costi dell'elettronica possono considerarsi ormai stabili, per cui il rapporto di costo tra le due soluzioni, di circa 1,4, potrebbe favorire il sistema redox.

Il vantaggio dell'accumulo al litio è sicuramente quello relativo al volume occupato, non si hanno a disposizione le dimensioni della sala che dovrà accogliere il sistema di Painesville, ma la VRB, altro produttore di batterie a flusso al vanadio, ha fornito le dimensioni e le caratteristiche di quella di un sistema simile (stessa potenza e metà dell'energia di quello statunitense).

Per un sistema di capacità di 8 MWh si ricava indicativamente che le dimensioni della sala destinata ad accoglierlo sono 41,5 m x 35 m x 4,5 m. Nel caso della batteria al litio pensando di lasciare ad ogni singolo pacco uno spazio a disposizione di 1,2 m x 0,4 m x 0,5 m: una struttura alta 5 m, per una lunghezza di 25 m ed un larghezza di 3 m potrebbe essere sufficiente per montare tutto il sistema e gestirlo con comodità, il rapporto di superficie occupata dalla due strutture è di 19 volte superiore per le redox.

È stata anche condotta un'analisi dei possibili benefici economici e vantaggi relativi alla installazione di un sistema di accumulo redox a flusso, che sono anche legati alle molteplici funzioni che questo può svolgere all'interno di un "distretto" elettrico: quali ad esempio, ottimizzazione nell'uso di impianti di generazione di tipo eolico o fotovoltaico ed abbassamento della potenza da impegnare nella rete di trasmissione/distribuzione. I dettagli dell'analisi economica, parte dall'impianto prototipale installato negli Stati Uniti ed usa i dati noti di costo di tale impianto per trasferirli ad una possibile applicazione nel sud dell'Italia.

In base ai risultati dell'analisi, la ricerca sulle batterie a flusso e sulle loro applicazioni è giustificata sia per il costo delle stesse rispetto a quello delle altre tipologie di accumulo sia per la loro capacità di disaccoppiare l'energia e la potenza dell'accumulo.

⁴ J. Startari, Ashlawn Energy LLC, "Painesville Municipal Electric Power Vanadium Redox Battery Demonstration Project", 2012 DOE Energy Storage Program Peer Review and Update Meeting, Washington, DC on Sept. 26 – 28, 2012

Accumulo mediante Idrogeno

Per il caso dell'accumulo mediante idrogeno sono state poste le seguenti ipotesi:

- l'accumulo è finalizzato alla riserva di energia
- i tempi di accumulo e di rilascio dell'energia sono dell'ordine delle ore (10 - 70 h)
- nell'area interessata non vi è la possibilità di utilizzare il pompaggio in bacino idrico o l'accumulo mediante aria compressa.

Con riferimento alla analisi economica sviluppata per un nodo della rete elettrica nel sud dell'Italia si è individuata una soluzione per l'accumulo ad idrogeno. Il tipo di impianto individuato, sulla base dei dati di ore di congestione, perdita di efficienza e potenza rinnovabile installata, sarebbe indicativamente così composto:

- AC/DC converter (80 MW):
- impianto di elettrolisi alcalina (80 MW), output: idrogeno a 30 bar;
- compressore idrogeno da 30 bar sino a 200 bar;
- stoccaggio idrogeno a 200 bar (30.600 kg di idrogeno),
- motore diesel alimentato a idrogeno con alternatore (40 MW).

I vantaggi di questo sistema sono

- rapidi tempi di risposta;
- elevata densità energetica dell'accumulo (555 kWh/m^3 per idrogeno a 200 bar, inferiore soltanto a quella dei combustibili fossili tradizionali liquidi o solidi);
- possibilità di accumulare quantità elevate di energia (nell'ordine dei GWh) e tempi di scarica da ore a settimane.

Il rendimento di sistema può essere stimato considerando i seguenti fattori:

- capacità di accumulo: sino a 18 ore in carica alla potenza massima (80 MW);
- capacità di scarica: sino a 9,9 ore alla potenza massima (40 MW)
- Efficienza AC/DC converter e impianto di elettrolisi (80 MW) = 70%
- efficienza compressione idrogeno a 200 bar = 93,3%
- idrogeno compresso (200 bar) prodotto = 940,5 MWh pari a 3.385.670 MJ pari a 28.214 kg di idrogeno (120 MJ/kg): con una densità di $16,67 \text{ kg/m}^3$ (densità idrogeno a 200 bar) abbiamo 1.692 m^3 cioè un serbatoio sferico del diametro di 14,8 m, o, se possibile, uno o più carri bombolai
- efficienza di motore (40 MW) diesel 40%, efficienza alternatore (40MW) 98%
- efficienza combinata motore e alternatore: 39,2%

Round trip efficiency = 25,6 %.

L'efficienza complessiva di questo sistema di accumulo è tra le più basse; (per confronto il pompaggio in bacino idrico ha un'efficienza del 70-80%, i sistemi con batterie possono arrivare al 95% nel caso di sistemi litio-ione).

Nonostante i numerosi contatti presi con importanti operatori industriali internazionali per richiesta di informazioni di tipo tecnico ed economico sugli impianti, non si sono avuti riscontri ufficiali. Pertanto, per la stima dei costi, si è fatto ricorso a dati di letteratura e a considerazioni ingegneristiche.

- Elettrolizzatori da 80 MW; valori da letteratura: 830 US\$/kW;
340 US\$/kW *in caso di produzioni su larga scala*
si è assunto prudenzialmente il valore più alto per cui per 80 MW il costo degli elettrolizzatori è valutabile in 50 M€ (rapporto di cambio euro/dollaro di 1,33).
- Compressori; sulla base della potenza individuata (3,8 MW), si è stimato un costo indicativo pari a 2,8 M€
- Serbatoio di accumulo; valori da letteratura: 900 US\$/ kg H₂ utilizzabile
204 – 1080 US\$/kg H₂ utilizzabile
500 US\$/kg H₂ utilizzabile.
assumendo prudenzialmente il valore più alto per 28.214 kg di idrogeno da accumulare il costo del serbatoio è stimabile in 23 M€.
- Gruppo motori diesel alimentati a idrogeno e alternatori (39,2MW); assumendo un costo di stima di 300 k€/MW si ha un costo totale di 12 per una potenza elettrica indicativa di 40 MW.

In totale il costo di investimento dovrebbe aggirarsi sugli 88 M€, cui va aggiunto circa un 20% per opere civili e Balance of Plant (BoP), sino a raggiungere 105 M€, come ordine di grandezza. A fronte di questo investimento bisogna tenere conto dei costi di investimento evitati per il mancato rinforzo delle linee elettriche a 150 kV.

Per avere un'idea degli ordini di grandezza in gioco, tenendo conto del costo chilometrico medio di rinforzo pari a 0,9 M€/ km, un mancato adeguamento di 50 km di linea a 150 kV verrebbe a valere 45 M€.

Analogamente a quanto sopra riportato per il caso della batteria a flusso, si ipotizza ancora di inserire il sistema di accumulo con idrogeno in prossimità del nodo della rete nel sud dell'Italia (Foggia).

Sulla base delle ipotesi fatte, il margine economico derivante dall'esercizio dell'impianto sopra descritto è pari a 785.000 €/anno, relativamente al guadagno che nasce dalla differenza del prezzo dell'energia elettrica in fase di accumulo e in fase di rilascio. A tale cifra vanno però sottratti i costi di esercizio e manutenzione, che possono essere valutati intorno al 2% annuo, rispetto al costo di investimento (2 M€/anno) e aggiunti eventuali costi evitati di esercizio e manutenzione della rinnovata linea elettrica a 150 kV.

Dato che il costo preponderante dell'investimento è costituito dagli elettrolizzatori, sarebbe da verificare, mediante un'analisi di sensibilità, l'effetto ottenibile variando la potenza degli stessi.

La situazione migliore risulta essere quella del caso degli elettrolizzatori da 100 MW, ma c'è da notare che in questo caso le ore di funzionamento dei gruppi diesel dovrebbero essere 337 in un anno, a fronte delle 254 ore annue individuate come ore disponibili di energia elettrica a prezzo alto.

Se si introducono i valori target della produzione in serie per gli elettrolizzatori e lo stoccaggio dell'idrogeno (rispettivamente 255 €/kW e 375 €/kg di H₂), si ottengono i risultati riportati in Tabella 14.

Tabella 14. Analisi parametrica del guadagno con i costi di produzione in serie per i componenti del sistema di accumulo

Costo di investimento con valori target per elettrolizzatori e stoccaggio idrogeno										
Potenza elettrolizzatori (MW)	Potenza gruppi diesel (MW)	Elettrolizzatori (M€)	Compressore (M€)	Serbatoio (M€)	Gruppi diesel (M€)	Totale impianti (M€)	Opere civili e BoP (20%) (M€)	Totali (M€)	Costo annuo esercizio e manutenzione (2%) (M€/anno)	Margine operativo economico da acquisto e vendita energia elettrica (M€/anno)
40	48	10,2	1,4	5,3	13,5	30,4	6,1	36,5	0,73	0,77
60	48	15,3	2,1	7,9	13,5	38,8	7,8	46,6	0,93	1,06
80	48	20,4	2,8	10,6	13,5	47,3	9,5	56,8	1,14	1,54
100	48	25,5	3,5	13,2	13,5	55,7	11,1	66,8	1,34	1,93

Si può osservare che si ottiene un margine economico positivo, anche se l'investimento presenta tempi di ritorno lunghissimi: nel caso di elettrolizzatori da 80 MW e gruppi diesel da 48 MW il pay-back time semplice sarebbe di 142 anni.

È evidente quindi che l'elemento decisivo per questo tipo di investimento è costituito dai costi evitati per l'adeguamento delle linee a 150 kV. Utilizzando il valore medio previsto per tale adeguamento 0,9 M€/km, si deduce che mancati adeguamenti di linea dell'ordine di 40-70 km possono influire moltissimo sul bilancio economico, fermo restando che, in generale, i benefici derivanti dalla rivendita dell'energia elettrica prodotta non riescono a compensare i costi di esercizio e manutenzione di questi impianti.

Conclusioni

Sono stati valutati parzialmente e in prima approssimazione i costi, gli ingombri e i benefici dei due sistemi di accumulo oggetto dello studio, sulla base dei costi attuali stimati od applicati. Per un'analisi più approfondita è necessario inoltre calcolare i benefici derivanti dal mancato adeguamento della rete elettrica di trasmissione ad alta tensione alle potenze che sarebbero necessarie per utilizzare appieno la capacità produttiva installata di fonti rinnovabili.

Per quanto concerne l'accumulo costituito da batterie a flusso, anche in mancanza di informazioni dettagliate sullo stato della rete e dei costi per il mercato europeo e nazionale, si ritiene che possa esistere una gamma di applicazioni per le quali il rapporto benefici/costi ne giustifichi l'adozione.

Per il caso dell'accumulo con l'idrogeno, i costi di esercizio e manutenzione risultano superiori, o comunque dello stesso ordine di grandezza del beneficio ottenibile dalla rivendita della energia elettrica prodotta, e pertanto ben difficilmente tale soluzione potrà risultare economicamente conveniente, senza sostanziali future riduzioni dei costi degli elettrolizzatori e dell'accumulo dell'idrogeno derivanti da economie di scala e da miglioramenti tecnologici ed industriali.

d. Studio ed analisi del recupero di materiali da batterie a fine vita

Le attività di studio e ricerca sono state concentrate sulle problematiche di riciclo e recupero a fine della vita dei materiali attivi e non delle batterie litio-ione, in un'ottica di "soft-(green) chemistry". La sicurezza ed il recupero di tali batterie, svolgono ed, ancor di più nell'immediato futuro, svolgeranno un ruolo chiave nella diffusione su larga scala di tale tecnologia di accumulo in sistemi di grande taglia.

Recupero eco-sostenibile di materiali da batterie litio-ione esauste: studi preliminari

Un programma di riciclo delle batterie a litio per il recupero del metallo costituisce un'opportunità per permettere di ridurre la dipendenza del nostro Paese da fonti di approvvigionamento estere. Il riciclo delle batterie litio-ione è tuttavia attività complessa, in cui sono da valutare e gestire rischi chimici differenziati, che vanno dalla presenza di metalli a potenziale attività cancerogena, di vapori tossici (ad esempio acido fluoridrico) e di litio metallico anche in forma libera, che può essere causa di incendi ed esplosioni ove non adeguatamente gestito. Questo è da considerare un fattore critico nella progettazione di un eventuale processo di smantellamento e recupero, attività indispensabili sia dal punto di vista economico sia per la salvaguardia dell'ambiente. Per questo una particolare attenzione è stata indirizzata verso procedure di recupero del litio dai materiali che lo contengono utilizzando processi chimici a basso impatto ambientale, che possano essere in grado di minimizzare od al meglio annullare gli effetti sull'ambiente dei trattamenti proposti.

I principali materiali catodici usati nella fabbricazione delle batterie attualmente in commercio sono costituiti da: LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 e $\text{LiNi}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{O}_2$ e quelli anodici da grafite (con litio intercalato tra i piani grafenici) e titanati di litio. Data la rilevante variabilità delle forme in cui il litio è presente i metodi di recupero dovranno essere sviluppati tenendo conto delle differenze chimiche.

L'ENEA ha condotto un'attività di studio sia teorico che sperimentale connesso con la progettazione e lo sviluppo di processi produttivi ecosostenibili per il riciclo delle batterie al litio. Lo studio della letteratura e dei processi di riciclo attualmente proposti ha messo in evidenza la complessità della problematica che deve prevedere una corretta valutazione e gestione di rischi chimici differenti, che come detto in precedenza vanno dalla presenza di metalli a potenziale attività cancerogena, ai vapori tossici, e al litio metallico, possibile causa di esplosioni.

Sono stati portati a termine studi preliminari ed è stata acquisita esperienza sulle fasi di smantellamento di una batteria tipo con conseguente recupero dei materiali, operando su una batteria litio ione commerciale 18650 Sony.

La caratterizzazione chimico-fisica mediante le tecniche XRD, TG/DTA, pH, spettroscopie FT-IR e Raman, è stata eseguita sui materiali di riferimento (polveri commerciali) e sui materiali di recupero ottenuti dalla cella smantellata a fine vita. Il processo di recupero ha previsto una prima fase di valutazione dello stato di carica della batteria, una fase di scarica totale, l'apertura in sicurezza e la separazione e il recupero dei materiali attivi dai relativi supporti. La separazione dei diversi componenti è una fase critica del processo di riciclo: da essa può dipendere la quantità, la purezza e la struttura del materiale recuperato. Un aspetto chiave per lo sviluppo di processi di recupero eco-sostenibili è la possibilità di operare in mezzi di natura acquosa e/o in solventi organici ecologici. Pertanto l'attività è stata indirizzata all'individuazione di processi ecologici di separazione/distacco delle polveri attive dai relativi supporti solidi (metallici, plastici) mediante solvatazione in opportune miscele di solventi organici eco-sostenibili e/o mediante separazione fisica per sonicazione in acqua. È stata realizzata una nuova miscela di solventi organici ecosostenibile per la separazione dei materiali attivi dai relativi supporti solidi; la miscela è tuttora in fase di ottimizzazione. Inoltre è stata individuata una tecnica di separazione fisica (FFF), con le caratteristiche di eco-sostenibilità richieste, che a nostra conoscenza non è stata mai applicata al recupero dei materiali da batterie al litio esauste. Sono stati effettuati test preliminari di stabilità in acqua dei materiali selezionati, anche in previsione di una possibile applicazione della tecnica.

Struttura di una batteria litio ione ricaricabile e materiali a fine vita

Il recupero dei materiali dalle batterie Li-ione si basa su una serie di operazioni preliminari comuni a tutti i processi di recupero attualmente proposti o in fase di sviluppo industriale. Prima di entrare nel dettaglio delle diverse fasi dell'attività svolta, è opportuno fornire una breve descrizione della chimica di base della cella agli ioni litio e dei singoli componenti.

Le batterie litio ione sono composte da una serie di celle che producono elettricità. Ciascuna cella ha tre componenti essenziali: un elettrodo positivo (catodo), un elettrodo negativo (anodo) e l'elettrolita. In Figura 74 è riportata la struttura di una batteria di tipo cilindrico e lo schema di una singola cella durante il processo di carica.

Il *materiale catodico* (elettrodo positivo) è un ossido o un ferro fosfato capace d'intercalare gli ioni litio in modo reversibile all'interno della propria struttura. Il materiale catodico delle batterie commerciali per apparecchiature

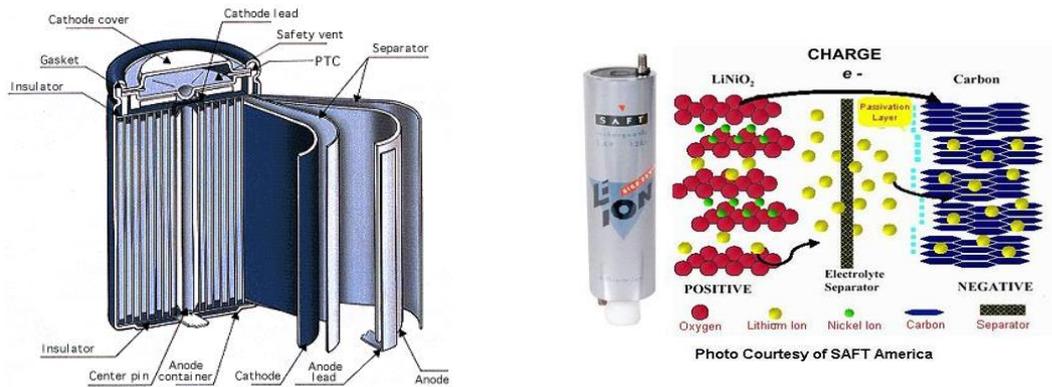


Figura 74. Batteria litio ione cilindrica e schema della cella elettrochimica [Fonte Automotive Energy Supply Corp., 2007]

elettroniche è solitamente LiCoO_2 . Poiché il cobalto è un metallo molto caro, in questi ultimi anni si stanno sviluppando altri tipi di materiali quali LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 e $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$, per la fabbricazione di batterie di alta energia o potenza. Il LiMn_2O_4 , il manganito di litio (spinello), riveste come catodo nelle batterie litio ione un particolare interesse dovuto all'elevata tensione di scarica (4 V), alla buona capacità specifica teorica (148 mAh/g), al basso costo e al basso impatto ambientale. Tuttavia, non è stabile termicamente sopra i 50 °C a causa delle transizioni di fase che rendono il processo di intercalazione del litio più difficile con riduzione della capacità specifica.

Il LiFePO_4 è uno dei materiali emergenti per applicazione nelle batterie al litio ricaricabili. L'elevata capacità teorica (170 mAh/g), la tensione di scarica elevata (3,5 V), l'ottima ciclabilità, dovuta alla scarsa degradazione del materiale, e una buona stabilità chimico fisica anche a temperature superiori ai 100 °C, lo rendono un materiale molto interessante per applicazioni nelle batterie litio ione per veicoli elettrici. Inoltre il materiale non è tossico ed i suoi componenti sono a basso costo. Ha una bassa conducibilità ionica che viene incrementata miscelando il materiale catodico con il carbone.

L'elettrolita liquido è formato da un sale di litio sciolto in un solvente organico aprotico o in una miscela di solventi. I più comuni sono riportati in Tabella 15, insieme ai relativi solventi organici. I sali di litio fluorurati sono dei materiali molto costosi, ma vengono usati in soluzioni non concentrate; di solito 1 M. Il LiPF_6 è il sale più usato per la sua elevata conducibilità ionica e stabilità elettrochimica con etilencarbonato. Ha lo svantaggio di reagire facilmente con acqua formando acido fluoridrico corrosivo e di essere molto sensibile alle temperature. Il LiClO_4 è meno sensibile all'umidità ma può dar luogo ad esplosioni. Il LiBF_4 è particolarmente stabile ed usato per applicazioni ad alta temperatura. Il LiAsF_6 è meno sensibile all'umidità ma può essere usato solo per applicazioni in laboratorio data la sua tossicità. Ogni produttore di batterie al litio ha sviluppato un elettrolita specifico, con o senza additivi, per migliorare le prestazioni e la sicurezza delle proprie batterie.

Tabella 15. Principali sali di litio fluorurati e solventi organici contenuti nelle litio-ione

Sali di litio fluorurati		Solventi organici	
Litio esafluoro arseniato	LiAsF_6	Propilen Carbonato	PC
Litio esafluoro fosfato	LiPF_6	Etilen Carbonato	EC
Litio tetrafluoro borato	LiBF_4	DiEtil Carbonato	DEC
Litio (bis(trifluorometansulfonil)Immide)	$\text{LiN}(\text{SO}_2\text{CF}_2\text{CF}_3)_2$	DiMetil Carbonato	DMC
Litio trifluorometansulfonato	LiCF_3SO_3	DiMetossi Etano	DME
		EtilMetil Carbonato	EMC

Il materiale anodico (elettrodo negativo) è costituito in molti casi da grafite o carbone coke depositato su lamina di rame. Gli anodi di grafite sono relativamente sicuri, hanno un basso costo, una buona capacità teorica che supera i 370 mAh/g ed hanno una struttura adatta per intercalare il litio; intercalano un singolo ione litio per ciascun esagono, per una composizione a pieno carico nominale di LiC_6 . Le caratteristiche cercate per una buona grafite sono la massima porosità con una minima area superficiale per ridurre la decomposizione dell'elettrolita. Altri materiali, inclusi il silicio e lo stagno, sono studiati in letteratura per applicazioni come anodo.

Durante il primo ciclo di carica una batteria ha una perdita di capacità irreversibile dovuta alla riduzione dell'elettrolita sulla superficie dell'elettrodo di grafite. La prima carica porta quindi alla formazione di un film passivante SEI (Solid Electrolyte Interphase) costituito da prodotti di degradazione dei sali inorganici e di

decomposizione del solvente organico dell'elettrolita. Nel caso ideale, questo film stabilizza l'elettrodo proteggendolo da ulteriori degradazioni nei cicli successivi, consentendo comunque il passaggio agli ioni litio. Inoltre protegge l'elettrodo di grafite da eventuali co-intercalazioni del solvente (esfoliazione della grafite), evita la formazione di strutture dendritiche che crescendo possono cortocircuitare gli elettrodi provocando problemi di sicurezza.

Il *separator* ha la funzione essenziale di mantenere l'elettrodo positivo e negativo separati per evitare che possano venire a contatto con gravi conseguenze per l'uomo e l'ambiente. Inoltre, il separatore serve come dispositivo di sicurezza, essendo costituito da membrane di poliolefine (PP/PE/PP) (PP polipropilene e PE polietilene) basso fondenti con il 50% di porosità. Nel caso in cui una cella diventi troppo calda, il polimero fonde chiudendo i pori attraverso cui gli ioni litio viaggiano ed arrestando così il flusso di corrente.

Infine il *legante* è importante per il funzionamento di una batteria in quanto permette alla pasta catodica di aderire al collettore di corrente metallico. Il polivinilidene fluoruro (PVdF) disciolto in N-metil-2-pirrolidone (NMP) è il legante più usato nelle batterie al litio per le sue caratteristiche di inerzia chimica verso l'elettrolita (LiPF_6) e il litio, per la stabilità termica e la lavorabilità meccanica.

A fine vita le batterie al litio presentano una perdita di capacità nel tempo che ne determinano la fine vita. La perdita di capacità può essere osservata anche durante il funzionamento, o dopo uno stoccaggio prolungato. Questa perdita può essere attribuita a diversi meccanismi quali:

- 1) aumento d'impedenza interfacciale risultante dalla precipitazione di specie ridotte ed ossidate sulla superficie degli elettrodi con conseguente riduzione di ioni litio disponibili per le reazioni reversibili di carica e scarica;
- 2) espansione e contrazione della struttura cristallina del catodo durante la reazione di intercalazione, che potrebbero causare la perdita di contatto elettrico con il collettore di corrente;
- 3) espansione della struttura cristallina della grafite dovuta all'intercalazione tra gli stati di grafite di specie provenienti dalla degradazione dei solventi;
- 4) effetto della temperatura che svolge un ruolo importante sulla stabilità dei film SEI;
- 5) condizioni di over carica e scarica.

Processi di recupero e di riciclo di una batteria litio ione

Le normative e i processi di trasformazione riguardanti il recupero e riciclo di materie prime da rifiuti speciali provenienti da batterie elettrochimiche di larga diffusione (es. piombo, Ni-MH), eventualmente accompagnato anche da recupero energetico, sono in rapida e continua evoluzione industriale. Analogamente, per il recupero dei materiali da batterie al litio, la ricerca attuale si propone il fine di sviluppare processi di recupero con un forte carattere di eco-sostenibilità e ad alta efficienza energetica. Classicamente, si possono distinguere due tipi principali di processo che includono varie operazioni chimiche e fisiche: processi idrometallurgici e pirometallurgici.

Il *processo idrometallurgico* include una prima fase di apertura in sicurezza della batteria, la separazione di alcuni componenti che può avvenire anche manualmente, una fase di macinazione e l'estrazione dei metalli attraverso il processo di lisciviazione acida, in cui gli acidi più usati sono HNO_3 , HCl e H_2SO_4 , o basica in cui si utilizza solitamente NH_4OH . Una volta in soluzione, i metalli sono recuperati attraverso processi di precipitazione selettiva ed elettrochimica sotto forma di ossidi o sali.

Nel *metodo pirometallurgico* si utilizzano alte temperature di processo, non consentendo quindi il recupero delle materie plastiche, né delle sostanze organiche come la grafite o il carbone, normalmente presenti nelle batterie litio ione. E' quindi un tipo di processo idoneo al solo recupero dei materiali metallici. Temperature tipiche di processo sono nell'intervallo 800-1250 °C, e il processo viene condotto in assenza di ossigeno. In Tabella 16 sono evidenziate le differenze principali tra i due tipi di processo, riferiti alle celle contenenti cobalto e nichel.

Tabella 16. Confronto delle caratteristiche dei processi di recupero pirometallurgico e idrometallurgico.

	Processo Pirometallurgico	Processo Idrometallurgico
Temperatura	Alta (800-1200°C)	Bassa (<200°C)
Materiali Recuperati	Co, Ni	Sali metallici, $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{LiOH}$
Commenti	Vantaggi: assenza di rifiuti solidi pericolosi Svantaggi: 1) Consumo elevato di energia 2) Grafite non è recuperata 3) Produzione di gas corrosivi	Vantaggi: 1) Basso consumo di energia 2) Nessuna emissione di gas in aria Svantaggi: Rifiuti pericolosi.

Procedure per il smantellamento e recupero delle batterie al litio a fine vita

Lo studio dello smantellamento e del recupero dei materiali dalle batterie Li-ione è iniziato con l'individuazione di una serie di operazioni preliminari che sono risultate comuni a molti processi di recupero attualmente proposti in letteratura o in fase di sviluppo industriale. Queste operazioni possono essere riassunte nei passi seguenti:

- 1) *Scarica completa della batteria*: quest'operazione iniziale è fondamentale per la sicurezza dell'uomo e dell'ambiente. Una carica residua potrebbe, infatti, dar luogo a scintille nel caso in cui i poli vengano incautamente cortocircuitati, con conseguente possibilità di incendi.
- 2) *Apertura della batteria (smantellamento)*: questa fase deve essere eseguita in condizioni di sicurezza perché all'interno della batteria esausta l'eventuale presenza del litio metallico potrebbe provocare una reazione esplosiva a contatto con l'umidità dell'aria. Inoltre, l'elettrolita (di solito LiPF₆) a contatto con l'umidità forma l'acido fluoridrico, estremamente tossico.
- 3) *Rimozione delle parti metalliche e plastiche facilmente separabili*: il materiale plastico e metallico dell'involucro è separato manualmente dal resto del materiale (nastro catodico, nastro anodico e del separatore).
- 4) *Separazione delle polveri attive dai relativi supporti metallici e polimerici*: l'adesione ai collettori del materiale attivo catodico e anodico durante il funzionamento della batteria è garantito dalla presenza nelle polveri di un legante polimerico, generalmente PVDF. Al fine di separare il legante e permettere così alle polveri attive di staccarsi dal relativo materiale di supporto sono stati testati due metodi, uno di tipo chimico, l'altro di tipo fisico.
 - a) metodo chimico di solvatazione: utilizzo di solventi organici;
 - b) metodo fisico di sonicazione: la separazione del legante polimerico dalla polvere viene attivata sonicando in acqua la dispersione.

Per i dettagli sulla messa a punto delle varie fasi di questa procedura e sulle caratterizzazioni chimico-fisiche eseguite sui materiali anodici e catodici della batteria si rimanda al rapporto RdS/2013/256.

Lo studio effettuato ha evidenziato la complessità del processo di smantellamento e recupero, costituito da numerose operazioni chimico-fisiche. Incoraggianti risultati preliminari sono stati raggiunti sull'operazione di separazione, critica per tutti i tipi di processi di recupero, utilizzando un solvente *appositamente progettato* per il processo di separazione chimica (solvatazione) dei materiali attivi dai supporti solidi.

Inoltre, la fase di separazione dei materiali è stata anche studiata tramite un processo fisico di sonicazione di una miscela di materiale catodico e legante, dispersa in un mezzo acquoso. I risultati dei test hanno dimostrato la fattibilità della separazione dei materiali in un mezzo altamente eco-sostenibile. Per valutare l'applicabilità del metodo fisico sono state eseguite prove di stabilità in acqua sui materiali catodici commerciali di riferimento e sui materiali recuperati dalla batteria commerciale, in previsione anche del possibile utilizzo della *tecnica Field Flow Fractionation*, individuata e attualmente mai utilizzata a nostra conoscenza, per il riciclo delle batterie al litio.

I risultati parziali riguardanti il metodo chimico di solvatazione e quello fisico di sonicazione, seppur molto incoraggianti, necessitano di ulteriori approfondimenti. Inoltre, le diverse fasi del processo di recupero devono essere ottimizzati, in considerazione anche delle maggiori dimensioni delle batterie per le applicazioni stazionarie nelle reti elettriche, ed in previsione di uno scale-up industriale.

e. Studio di sistemi di accumulo avanzati basati su magneti superconduttori

Le attività sui sistemi di accumulo in magneti superconduttori (SMES) sono state incentrate nell'individuazione del materiale superconduttore più adatto ad essere utilizzato per un prototipo dimostrativo, e la sua caratterizzazione in termini di misura delle proprietà di trasporto alle basse temperature.

Presso ENEA sono state condotte attività che hanno riguardato:

1. studio dei materiali più promettenti per SMES ad alta temperatura;
2. acquisizione e caratterizzazione di diversi materiali superconduttori;
3. caratterizzazione dei materiali in una stazione di prova appositamente allestita con la verifica delle principali prestazioni,
4. produzione di nastri e relativa caratterizzazione;
5. progetto di massima di un prototipo di SMES.

I sistemi di accumulo magnetici basati su sistemi superconduttori a temperature superiori a quelle dell'elio liquido hanno una forte potenzialità per essere utilizzati con tutti i tipi di fonti energetiche rinnovabili senza aumentarne i costi in modo non sostenibile.

Le attività di ricerca si sono quindi state concentrate sulla individuazione del materiale superconduttore più adatto ad essere utilizzato per l'eventuale prototipo dimostrativo, di cui è stato fatto un progetto di massima. I materiali selezionati sono stati caratterizzati in termini di misura delle proprietà di trasporto alle basse temperature.

Attualmente, l'utilizzo degli SMES è limitato dalla complessità e dai costi connessi al sistema criogenico che serve al mantenimento delle temperature dell'elio liquido, necessaria al funzionamento dei materiali finora utilizzati (NbTi, Nb₃Sn). Malgrado queste limitazioni, i potenziali vantaggi di questi dispositivi nei confronti degli altri sistemi proposti sono risultati evidenti e hanno giustificato le attività di ricerca e sviluppo portate avanti in vari laboratori: basti pensare, ad esempio, alla assenza di problemi di smaltimento e al numero virtualmente infinito di cicli che possono essere effettuati.

Le caratteristiche che rendono gli SMES vantaggiosi rispetto ad altri sistemi di accumulo possono essere sintetizzati nei punti seguenti:

- l'elevata densità di potenza e di energia li rendono di fatto generatori di corrente direttamente utilizzabili sulla rete;
- la risposta immediata nel tempo;
- il numero di cariche e scariche è praticamente infinito;
- è un sistema statico e pertanto richiede poca manutenzione,
- efficienza di conversione molto elevata (> 97%);
- bassissimo impatto ambientale.

Attualmente l'uso degli SMES nelle reti elettriche è condizionata da alcuni importanti limiti:

- contenuto energetico specifico relativamente basso, se confrontato con altre tecnologie (ad esempio con le batterie) e grandi quantità di energia accumulata sono ottenibili solo con ingombri elevati,
- la criogenia del dispositivo rappresenta una complicazione del sistema non trascurabile, con ovvie ripercussioni sulla sua adattabilità agli ambienti industriali in cui deve operare e soprattutto sul costo.

Questi limiti sono sostanzialmente riferiti ai sistemi basati su materiali superconduttori operanti a basse temperature di criogenia (LTS, Low Temperature Superconductor). Infatti il principale ostacolo per le applicazioni degli SMES su larga scala è costituito dal loro elevato costo. Nel caso dei materiali LTS la parte superconduttiva e la refrigerazione incidono sul costo totale del sistema rispettivamente per il 62 e 24%.

Nella fase preliminare del progetto sono stati presi in considerazione i superconduttori MgB₂ (diboruro di magnesio) e YBCO (lega ittrio bario rame ossigeno), due materiali ampiamente studiati per le loro temperature di transizione elevate (38 K e 92 K rispettivamente). Nonostante siano ancora oggetto di sperimentazione questi composti iniziano ad essere prodotti su scala industriale e ad essere disponibili sul mercato, con costi che sono funzione delle tecnologie realizzative e dei materiali di partenza utilizzati.

La caratterizzazione dei materiali è un passo fondamentale per determinare le prestazioni, le dimensioni ed il costo dello SMES. Pertanto, in questo primo anno di sviluppo del progetto, è stata fatta un'attenta valutazione delle caratteristiche dei materiali disponibili, portata avanti mediante un'estesa campagna di misure di caratterizzazione, aventi lo scopo di stabilire la rispondenza dei materiali all'utilizzo preposto.

Unitamente al lavoro di caratterizzazione, è stata effettuata una valutazione sulla taglia di un dispositivo da proporre ai fini dell'eventuale realizzazione di un prototipo. Questi dispositivi sono stati sviluppati per utilizzi che vanno dall'immagazzinamento di poche decine di kJ (microSMES), fino strutture in grado immagazzinare vari GJ.

Un dispositivo SMES di taglia medio-piccola (0,5 - 1 MJ di energia immagazzinata) sembra essere quello in grado di dare sufficienti garanzie di funzionamento, realizzabilità e contenimento dei costi. Un progetto di massima della configurazione geometrica del magnete superconduttore ed una valutazione dei costi del sistema viene quindi esposto come prima indicazione di obiettivo da realizzare.

Scelta dei materiali

Gli SMES si configurano come sistemi da utilizzare per il controllo della stabilità dei sistemi di distribuzione e per il miglioramento della Power Quality, con un campo di applicabilità sovrapponibile a quello di altri dispositivi di accumulo elettrici, quali i supercapacitori per alta potenza, caratterizzati anche loro da elevato power rating ma limitata durata dell'erogazione della energia immagazzinata.

I materiali prescelti per la realizzazione del magnete sono l'YBCO e il MgB₂.

I nastri di YBCO di seconda generazione (2G YBCO tapes) rappresentano la sintesi e l'evoluzione di un lungo lavoro di R&D, tuttora in corso, portato avanti da molti anni in vari laboratori, tra i quali anche quello dell'ENEA Frascati. A causa della sua forte anisotropia, l'YBCO deve necessariamente essere depositato su substrati che ne determinino una precisa orientazione cristallina, orientando i piani cristallografici (a, b) lungo la direzione di scorrimento della corrente. In Figura 75 sono illustrate la struttura cristallografica del materiale e la tipica configurazione del materiale depositato in laboratorio.

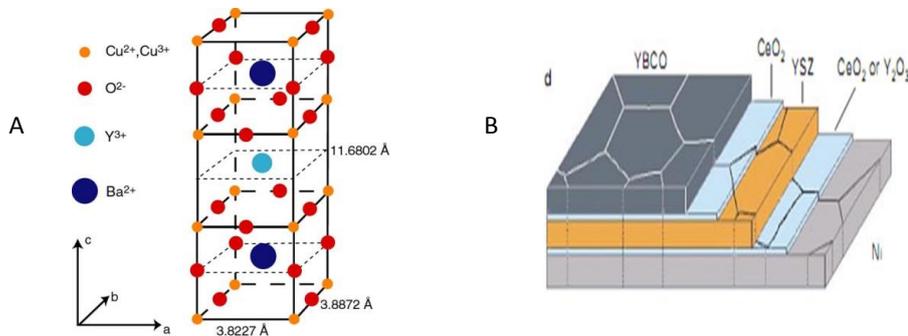


Figura 75. Struttura cristallografica dell'YBCO (A) e schema di nastro superconduttore (B)

I nastri prodotti dalle varie industrie presentano tutti, a vario grado, caratteristiche di media fragilità meccanica e termica, e necessitano quindi di attenzioni per la loro manipolazione. In particolare, non devono essere superati:

- raggi di curvatura inferiori ai 2,5 cm, in quanto provocano il danneggiamento meccanico permanente del conduttore;
- riscaldamenti a temperature superiori a 180 °C per tempi maggiori di 60 secondi.

In tabella 17 sono riportate le ditte fornitrici dei nastri utilizzati nello studio, La ditta SuperOx ha fornito il nastro gratuitamente per fini di test della produzione. Ad agosto 2013 l'ENEA è stata contattata da altre ditte, tra le quali la giapponese Fujikura, in grado di produrre un materiale di elevate prestazioni, ma estremamente costoso.

Tabella 17. Prospetto delle ditte fornitrici nastri di YBCO e relative proprietà.

Ditta	Larghezza (mm)	Costo (\$/m)	Corrente critica max (A) [77 K, B = 0]
SuperPower (US)	4	50	120
American superconductor (US)	5 - (4 mm di sc + 0.5 mm di Cu laterale)	48	100
SUNAM (S. Korea)	5	20	160
SuperOx (Russia)	4	Test produzione	80

In alternativa, il diboruro di magnesio MgB_2 è stata investigato come materiale per gli SMES per via della sua temperatura critica (38 K), la più alta tra gli LTS, e della sua economicità.

Il diboruro di magnesio prodotto in laboratorio viene generalmente depositato sotto forma di film, ottenuti per sputtering, per co-evaporazione, o per CVD da diborano (B_2H_6). Non sono necessari particolari substrati in quanto il materiale, pur presentando anisotropie nella conduzione di corrente, non ha problemi di epitassia a causa della sua struttura cristallina semplice. A livello industriale il processo di produzione avviene mediante la tecnica Powder In Tube (PIT), in cui si ottiene il materiale attraverso la reazione termica in ambiente controllato di polveri formate dai singoli componenti. In Figura 76 sono riportate alcuni tipi di cavi ottenuti con questa tecnica.



Figura 76. Differenti geometrie e layout di distribuzione dei filamenti di MgB_2

Le lunghezze di prodotto ottenibili sono chiaramente funzione sia delle dimensioni di partenza sia di quelle finali che si vogliono raggiungere. Attualmente, lunghezze di nastro di 1000 m sono facilmente ottenibili. Il costo del materiale è basso, soprattutto se confrontato con i prezzi di mercato dell'YBCO, ed è di circa 5 €/m. Campioni di MgB_2 di varia composizione sono stati forniti dalla ditta Columbus.

Risultati sperimentali

Per progettare il magnete superconduttore di uno SMES è necessario conoscere la temperatura di esercizio del dispositivo e le caratteristiche di trasporto del materiale nel campo creato dal magnete stesso. La caratterizzazione dei materiali è quindi essenziale per determinare le prestazioni, le dimensioni ed il costo del sistema.

Le caratterizzazioni eseguite hanno riguardato misure per la determinazione della corrente critica nelle varie condizioni di temperatura e campo magnetico. A questo scopo, un grosso sforzo è stato dedicato alla messa in opera dell'apparato sperimentale, costituito da un criostato equipaggiato con un magnete da 14 Tesla, da vari alimentatori di corrente di elevate prestazioni (correnti erogate dell'ordine dei 500 - 1000 A) e dalla costruzione di opportune strutture porta-campione.

In Tabella 18 si riportano i valori di corrente critica misurati in ENEA, da confrontare quelli dichiarati dalle ditte.

Tabella 18. Confronto tra i valori di corrente critica dichiarati e quelli misurati in laboratorio

Ditta	Corrente critica misurata [77 K, caB = 0] (A)	Corrente critica dichiarata [77 K, B = 0] (A)
SuperPower (US)	120	120
American superconductor (US)	116	100
SUNAM (S. Korea)	166	160

In Tabella 27 sono riportati i valori di corrente, misurati direttamente, e non, come sarebbe corretto, i valori della densità di corrente. Il motivo di questa scelta è nel fatto che le ditte generalmente non rendono noti i valori degli spessori depositati. Un rapido calcolo, in grado di dare una stima delle densità di corrente in gioco, fornisce un valore di circa $2 \cdot 10^7$ A/mm² per il nastro American Superconductor. Simili valori elevati si hanno per gli altri conduttori.

I valori di corrente critica sono stati ricavati eseguendo i fit delle curve corrente - tensione. In Figura 77 si riporta una di queste curve, relativa al materiale American Superconductor (AMSC), unitamente ai parametri di fit.

Per i nastri SUNAM e AMSC le misure sono state ripetute usando differenti lunghezze di nastro, con il fine di controllare eventuali difetti di uniformità di produzione mediante la campionatura dei risultati per alcuni punti di misura, generalmente B = 0 e B = 2 Tesla alle due temperature. I risultati di questi test non hanno mostrato differenze di comportamento.

L'andamento della corrente critica in funzione della orientazione del campione rispetto al campo è mostrata in Figura 78, sempre per il materiale AMSC. Differenze di comportamento non sono accentuate se non per valori del campo superiori a circa 2 Tesla. Un comportamento simile si osserva anche per i campioni SuperPower e SUNAM.

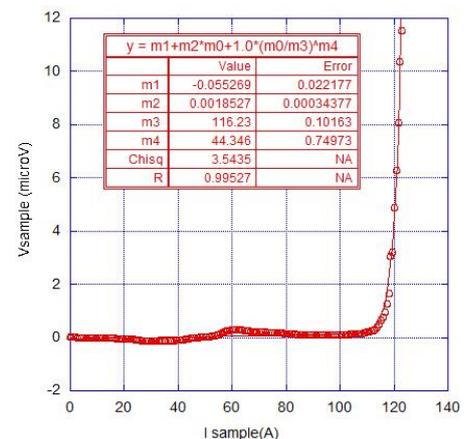


Figura 77. Curva sperimentale I-V e relativo fit per il campione AMSC a T=77K

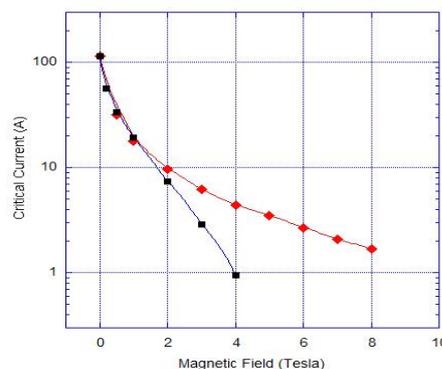


Figura 78. Andamento della corrente critica del campione AMSC misurato a T = 77 K con differente orientazione del campione rispetto al campo magnetico: perpendicolare (quadrati, blu) e parallelo (rombi, rossi)

Un considerevole incremento della corrente si ha eseguendo le misure in azoto liquido a 65 K di temperatura, punto in cui le prestazioni del materiale aumentano di circa un fattore due rispetto alle curve a 77 K per $B = 0$, e aumentano la loro capacità di portare correnti maggiori ad alti campi. A titolo di esempio, sempre per il nastro AMSC, la Figura 79 riporta gli andamenti della corrente critica I_c in funzione del campo magnetico presi alle due temperature.

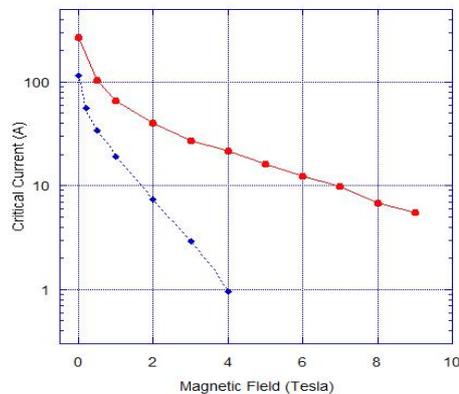


Figura 79. Curve della corrente critica del campione AMSC a 77 K (blue) ed a 65 K (rosso).

Le Tabelle 19 e 20 riassumono le prestazioni dei materiali caratterizzati alle due temperature di 77 e 65 K. Non è stato possibile ricavare i valori della corrente critica per il nastro SuperPower a 65 K, i dati nei grafici mostrano un comportamento resistivo per ogni valore del campo B . Una probabile delaminazione ha avuto luogo nel passaggio dai 77 ai 65 K, danneggiando il nastro in modo irreversibile.

Tabella 19. Correnti critiche (I_c) misurate a $T = 77$ K per vari valori del campo magnetico perpendicolare

	$B = 0.2$ T	$B = 0.5$ T	$B = 1$ T	$B = 2$ T	$B = 3$ T
AMSC	56.5	33.8	19.2	7.4	2.9
SuperPower	74	32.5	17.5	7.2	3.6
SUNAM	59.6	43.6	31.5	17.4	9.9
SuperOx	57	36.8	24.7	14.1	9.8

Tabella 20. Correnti critiche (I_c) misurate a $T = 65$ K per vari valori del campo magnetico perpendicolare. Il campione SuperOx è stato misurato a $T = 67$ K.

	$B = 0,5$ T	$B = 1$ T	$B = 2$ T	$B = 3$ T	$B = 4$ T	$B = 5$ T
AMSC	104.5	66	40.2	27.4	21.7	16.3
SuperPower	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
SUNAM	83	52.7	30.2	21	15	7
SuperOx	89.4	59.8	38	28.2	21.5	17.7

Le attività sperimentali sugli SMES sono state integrate da uno studio delle tecniche di avvolgimento dei nastri di YBCO e delle problematiche connesse.

Una volta prodotti, gli avvolgimenti sono stati caratterizzati eseguendo misure $I - V$ in bagno di azoto liquido alla temperatura di 77 K. La stazione di misura allestita a questo scopo comprende l'utilizzo di un contenitore termicamente isolato per il bagno di azoto, entro il quale posizionare la bobina, e l'utilizzo della stessa strumentazione usata per la caratterizzazione dei nastri. Una volta preparati, i campioni sono stati montati su un supporto di bakelite, contattati e misurati.

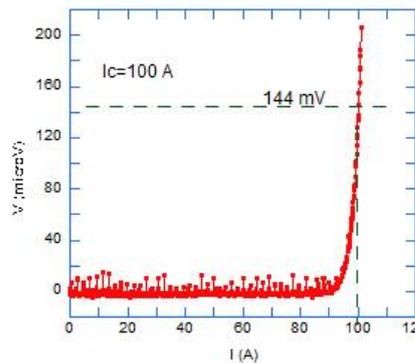


Figura 80. Curva corrente - tensione per un avvolgimento

Il risultato per un campione di avvolgimento è mostrato in Figura 80. Per questo campione il criterio di determinazione della corrente critica ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$) era di $V = 144 \mu\text{V}$, in quanto le prese di tensione erano saldate alle estremità della bobina. L'andamento della tensione mostra che l'intero processo di avvolgimento e impregnazione non ha danneggiato il campione. La corrente critica è più bassa di quella misurata sui nastri in quanto bisogna tener conto della presenza del campo magnetico creato dalla bobina.

Progetto di massima di un prototipo SMES

Un progetto di massima di uno SMES richiede lo studio ed il dimensionamento dei vari elementi che costituiscono il sistema. In questa fase dello sviluppo del dispositivo, l'attenzione è stata concentrata sullo sviluppo del magnete, elemento fondamentale dell'intera architettura, tenendo in mente gli obiettivi di riduzione dei costi e di fattibilità tecnica.

Il sistema di condizionamento della potenza (PCS) è funzione della taglia del dispositivo e dell'utilizzo previsto. I costi del PCS non sono pertanto quantificabili al momento, ma sono comunque connessi al progetto ed all'utilizzo di componenti standard di comune reperimento sul mercato.

Anche la progettazione del sistema di refrigerazione deve tener conto del dimensionamento e delle condizioni operative del magnete. Per quel che riguarda il MgB_2 è possibile sopporre una temperatura di funzionamento dell'ordine dei 20 K, e quindi l'utilizzo di un cryocooler a circuito chiuso di elio per la refrigerazione. Il costo di un impianto simile è funzione della quantità di energia termica che la macchina è in grado di estrarre alla temperatura operativa, ed è quindi connesso al dimensionamento del superconduttore.

Per l' YBCO , le condizioni operative ottimali sarebbero di poter lavorare in bagno di azoto liquido, alla temperatura di 77 K o alle temperature più basse ottenibili abbassando la tensione di vapore dell'azoto, due soluzioni, queste, che avrebbero il pregio di svincolare il sistema dall'uso di elio. Anche in questo caso le condizioni di lavoro del superconduttore e le dimensioni del magnete risultano fondamentali ai fini della scelta. Un abbassamento della temperatura di lavoro a 50 K sarebbe positivo per quel che riguarda le prestazioni del materiale, ma comporterebbe, di nuovo, l'utilizzo di cryo-cooler.

La progettazione del magnete è effettuata attraverso un processo di trial-and-error, in cui si simulano le prestazioni del dispositivo e si controlla che queste siano compatibili con le caratteristiche del materiale, il processo si ripete fino all'ottimizzazione. Unitamente alle prestazioni del magnete, in un secondo momento bisognerà considerare anche le eventuali sollecitazioni a cui il materiale è sottoposto. Questo passo comporterà un ulteriore affinamento e servirà a definire il magnete nella sua intera struttura. Le simulazioni delle prestazioni del magnete sono state eseguite facendo uso di software commerciali, quali COMSOL Multiphysics.

Per avere una stima della configurazione e della quantità di materiale necessario alla costruzione del magnete si parte dalla definizione delle caratteristiche del dispositivo, e cioè quantità di energia immagazzinata e potenza che deve essere disponibile al momento della sua entrata in funzione.

Il progetto di massima per magnete in MgB_2 ha questo obiettivo primario:

- ✓ *un dispositivo che possa immagazzinare 1 MJ ($1000 \text{ kW}\cdot\text{s} = 0,28 \text{ kWh}$), equipaggiato con una elettronica che consenta il passaggio di un max di 250 A.*

L'induttanza L del dispositivo è data da:

$$E = \frac{1}{2} L I^2 \rightarrow L = \frac{2E}{I^2} = \frac{2 \cdot 10^6}{250^2} = 32 \text{ H}$$

Con queste condizioni iniziali, è possibile procedere alla stima delle dimensioni del magnete. Supponendo un campo magnetico creato di 5 Tesla, dalla letteratura si ricava che un filamento di MgB₂ alla temperatura di 20 K è in grado di portare quasi 25 A/mm²; per questioni di protezione dal *quench*, si fissa la densità di corrente a 20 A/mm².

Tenendo conto delle dimensioni dei filamenti, si ha:

$$\text{diametro filo: } 2,1 \text{ mm} \rightarrow \text{Area filo: } A_{\phi} = \pi \times 1,05^2 = 3,8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$$

imponendo 250 A di corrente, considerando le caratteristiche del filo e indicando con N il numero di fili necessari a condurre 250 A:

$$N_{sc} = \frac{I}{J A_{\phi}} = \frac{250 \text{ A}}{3,8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2} = 3,2 \Rightarrow 4$$

Bisogna quindi lavorare con 4 fili in parallelo. La stima che segue adotta l'approssimazione di un solenoide di altezza h pari al diametro medio, come riportato in Figura 81. Le quantità che interverranno sono: spessore dell'avvolgimento s, lunghezza magnetica $L_m = \sqrt{2}h$, la sezione del superconduttore A_{ϕ} e la sezione del solenoide A, intesa come sezione geometrica riferita al diametro esterno del solenoide.

L'induttanza di questa configurazione è data dalla:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{L_m}$$

dove $N = \frac{h \cdot s}{A_{\phi}}$ è il numero complessivo di spire, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ e $A = \pi \left(\frac{h}{2} + \frac{s}{2} \right)^2$.

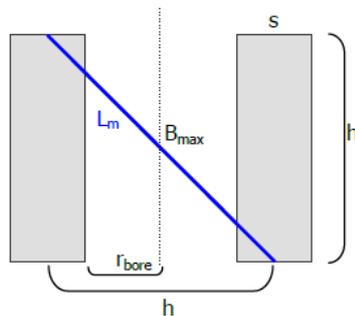


Figura 81. Schema di solenoide usato nella progettazione, con definizione della lunghezza magnetica L_m

Sostituendo:

$$L = \frac{\mu_0}{\sqrt{2}h} \left(\frac{h \cdot s}{A_{\phi}} \right)^2 \pi \left(\frac{h}{2} + \frac{s}{2} \right)^2$$

è possibile ricavare lo spessore note le altre quantità risolvendo l'equazione:

$$s^4 + 2hs^3 + h^2s^2 - \frac{4\sqrt{2}A_{\phi}^2 L}{\pi\mu_0 h} = 0$$

la soluzione è: $s = 6,75 \text{ cm}$ per $L = 32 \text{ H}$, $h = 50 \text{ cm}$, $A_{\phi} = 3,87 \text{ mm}^2$.

Il numero di spire sarà:

$$N = \frac{h \cdot s}{A_{\phi}} = 8720$$

tenendo conto che ogni spira è di 4 conduttori in parallelo, il numero complessivo di conduttori è:

$$N_{cond} = 8720 \cdot 4 = 34880$$

equivalenti a: $\pi H N_{cond} = 55 \text{ km}$. Supponendo un costo unitario di 4 €/metro; il costo del cavo necessario si aggira intorno a 210 k€.

La verifica che l'intensità del campo magnetico si aggiri effettivamente nei pressi del valore usato per queste stime viene fatto con simulazione agli elementi finiti, come illustrato in Figura 82. Il campo massimo è di circa 4.8 Tesla, in accordo con le stime, il dimensionamento della sezione di superconduttore sembra corretto per immagazzinare l'energia richiesta e lavorare al di sotto della corrente critica.

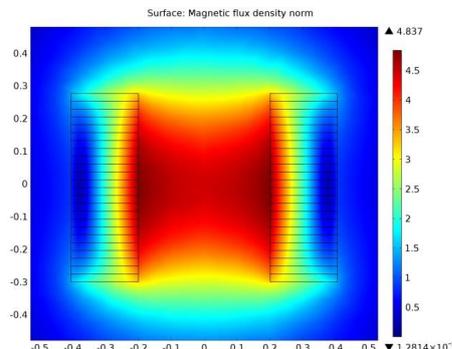


Figura 82. Risultati della simulazione ad elementi finiti per il magnete descritto nel testo

Questo progetto di massima per un sistema da 1 MJ indica che è necessario costruire un magnete 50 cm x 50 cm con spessore totale dell'avvolgimento di 6,75 cm, con un utilizzo minimo di 55 km di filo di MgB_2 , con una spesa per il materiale di circa 200 k€.

A questa stima vanno aggiunti i costi dell'impianto di refrigerazione, della costruzione del magnete, del sistema di controllo, etc. Un percorso di questo tipo sarà seguito per i materiali oggetto di questa ricerca, prendendo in considerazione i vari aspetti del sistema.

F. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

L'attività hanno riguardato la partecipazione attiva a diverse iniziative internazionali che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo dell'energia per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Pertanto sono proseguite le attività relative alla partecipazione alle attività dell'International Energy Agency (IEA) su "Energy Conservation through Energy Storage" e "Hydrogen".

Inoltre, si è intensificata la partecipazione all'European Energy Research Alliance (EERA), contribuendo principalmente al tema "Energy storage", al tema "Celle a combustibile ed idrogeno" (Joint Programme on Fuel Cells and Hydrogen, JP-FCH₂) e marginalmente, per la parte relativa all'accumulo, a quello sulle "Smart Grid", in cui l'ENEA sta svolgendo un ruolo attivo nel coordinamento e nell'esecuzione di attività di ricerca. Inoltre si è partecipato alle collaborazioni scientifiche e tecnologiche sull'accumulo, promosse dal circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo) all'interno di una specifica azione MP1004 "Hybrid-ES-Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications".

Si ricorda inoltre la partecipazione ad incontri in vista dell'avvio del nuovo Programma Quadro "Horizon 2020" e nel settore dell'idrogeno e delle celle a combustibile la partecipazione a N-ERGHY, il raggruppamento di ricerca della FCH-JU (partenariato pubblico-privato, creato dalla CE) ed all'International Partnership of hydrogen Economy (IPHE). Nella lista di queste partecipazioni internazionali non sono compresi gli impegni e le attività svolte all'interno di diversi Comitati Tecnici degli organismi di normazione nazionali (CEI, CTI) e internazionali (CENELEC e ISO) sulle tematiche dell'accumulo.

Il programma di lavoro è stato svolto esclusivamente dall'ENEA.

La partecipazione alle attività dell'IEA

La partecipazione alle iniziative IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia) si è sviluppata a vari livelli, tutti direttamente ed indirettamente connessi al tema dell'accumulo dell'energia nelle varie forme ed applicazioni.

In sintesi le collaborazioni svolte le seguenti:

▪ *Partecipazione al CERT (Committee for Energy Research and Technology)*

Il CERT ha il ruolo di coordinare e di valutare, attraverso i Working Party, le attività degli Implementing Agreement (Accordi governativi sui vari temi legati all'energia), inclusi quelli sull'accumulo elettrico e sull'idrogeno. ENEA partecipa alle riunioni come membro italiano.

Nel corso delle riunioni, che si sono tenute nella sede IEA a Parigi, si è discusso, tra, l'altro, della preparazione di una nuova Roadmap su "Energy Storage", per la quale è stata organizzata, nel febbraio 2013, una riunione con i diversi stakeholder, sia del mondo industriale che accademico, ed una seconda riunione a fine settembre. La Roadmap sarà pubblicata nella primavera 2014, dopo una fase di revisione congiunta con gli Implementing Agreement coinvolti.

In parallelo, a livello nazionale, si è avviata, con il Ministero dello Sviluppo Economico, un'attività di coordinamento della partecipazione nazionale agli Implementing Agreement che fanno capo al Working Party sugli Usi Finali (EUWP), ivi incluso "Energy Conservation through Energy Storage". Tale attività, tuttora in corso, ha lo scopo di diffondere i risultati delle attività IEA agli stakeholder interessati, nonché di sensibilizzare sulle opportunità che la partecipazione dell'Italia alle attività IEA presenta per gli operatori del settore.

▪ *Partecipazione all'IA ECES*

È proseguita la partecipazione italiana all'Accordo (IA) "Energy Conservation through Energy Storage". Sono inoltre in discussione nuovi progetti sull'impatto dell'accumulo sulle reti elettriche, anche in associazione con fonti rinnovabili.

L'ENEA partecipa per il momento alle attività del Comitato Esecutivo anche di supporto all'IEA nella redazione di documenti di strategia, mentre l'Italia negli ultimi anni ha visto la partecipazione dell'Università di Bologna su alcuni aspetti specialistici dell'accumulo termico. Nel periodo oggetto del presente rapporto annuale sono state tenute due riunioni del Comitato Esecutivo (a novembre 2012 in Nuova Zelanda ed ad aprile 2013 a Parigi) senza la partecipazione italiana. Comunque ci sono state attività di studio congiunte sulla strategia futura dell'IEA sull'accumulo, che ha fortemente coinvolto l'IA. Infatti è stata avviata una seria discussione sulla Roadmap per l'accumulo con enfasi maggiore per le applicazioni stazionarie, con un crescente ruolo dell'accumulo termico ed elettrico (di taglia notevolmente inferiori a quelle convenzionale fino a migliaia di MW).

È stata preparata una bozza della roadmap e si prevede di rendere disponibile il documento finale entro la primavera del 2014.

▪ *Partecipazione all'IA "Hydrogen"*

L'Accordo Internazionale di Collaborazione dell'IEA sulle attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione delle tecnologie dell'idrogeno ha al suo attivo oltre 30 anni di lavori coordinati, con risultati che lo hanno reso autorevole in tale campo su base mondiale.

Attraverso la supervisione di più di 30 tasks l'Accordo ha reso possibile l'attuazione di un'ampia varietà di programmi di ricerca e di analisi tra i paesi partecipanti. Il Piano strategico 2009÷2015 prevede i seguenti obiettivi:

- collaborazione internazionale, con attività sulla produzione di idrogeno, sull'accumulo, sui sistemi integrati e sulle infrastrutture;
- analisi, con attività sulle tecnologie, sul mercato e di supporto alle decisioni politiche attraverso le pubblicazioni di maggiore prestigio e diffusione dell'IEA;
- conoscenza e accettazione, con attività sulla diffusione dell'informazione, sulla sicurezza e sui benefici.

L'ENEA è stata coinvolta nei lavori condotti sull'accumulo (Task 22 "Fundamental & Applied Hydrogen Storage Development"), sulla produzione ad alta temperatura (Task 25 "High Temperature Production of Hydrogen", sull'analisi globale dei sistemi a idrogeno (Task 30 "Global Hydrogen System Analysis").

Il Comitato Esecutivo ha avuto come sempre due riunioni nel corso del 2012-2013. A queste due riunioni l'ENEA ha partecipato con il personale designato; sono infine stati trasmessi gli aggiornamenti relativi alla situazione nazionale dal punto di vista energetico e le maggiori decisioni politiche adottate dal governo.

La partecipazione alle attività di altri gruppi di lavoro internazionali

Sono state intensificate le attività di collaborazione nell'ambito di organismi europei che puntano ad aumentare le sinergie tra programmi nazionali ed europei sull'accumulo. In particolare, sono da considerarsi rilevanti le iniziative ed i contributi nell'ambito dell'Alleanza europea EERA e quella più limitata, ma utile per lo scambio e l'acquisizione di contatti ed informazioni, in ambito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica).

- *European Energy Research Alliance*

Nell'ambito della strategia europea sull'energia, definita nel SET-Plan (Strategic Energy Technology), 15 organizzazioni di ricerca europee hanno fondato l'EERA. L'obiettivo principale dell'EERA è quello di accelerare lo sviluppo di nuove tecnologie energetiche e sostenere i Programmi di Ricerca comuni in supporto al SET Plan e integrare attività e risorse, combinando i fondi nazionali con quelli comunitari e massimizzando la complementarità e le sinergie.

In EERA sono stati lanciati già 15 programmi comuni (Joint Programme, JP) su temi di interesse energetico, tra cui l'accumulo e le smart grids. Nel 2012, è stato lanciato il JP Accumulo ed all'ENEA è stata affidato il coordinamento del Sottoprogetto (SP) Accumulo Elettrochimico e partecipa iai Sottoprogetti Accumulo Termico ed Accumulo Chimico.

Inoltre ENEA è coordinatore JP "Idrogeno e celle a combustibile" (JP FCH₂), approvato nel novembre; sono state effettuate una serie di riunioni e workshop, da un lato per definire le tematiche di interesse e gli obiettivi per la ricerca di base di lungo periodo e dall'altro per allineare tali tematiche e obiettivi con quelli della piattaforma Europea FCH-JU in modo tale da evitare duplicazioni e sovrapposizioni sia a livello europeo che a livello nazionale. Un risultato interessante delle attività sin qui svolte è che si riscontra un crescente interesse sulle tematiche di produzione dell'idrogeno da rinnovabili, e in particolare da fonti rinnovabili convenzionali, quali l'eolico e/o il fotovoltaico, ai fini dell'accumulo energetico, con un forte interesse per l'elettrolisi in tutte le sue forme: alta e bassa temperatura, foto assistita, termo assistita, ecc..

Partecipazione a COST

È proseguita la partecipazione a COST MP1004 "Hybrid-ES - Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications", avviata nel 2010 su designazione ufficiale del Ministero della Ricerca Scientifica in rappresentanza dell'Italia nel Comitato tecnico di gestione. L'azione è parte del circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo), promosso dall'ESF (European Science Foundation), e finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro. L'impegno ha riguardato le attività sporadiche di coordinamento e gestione dell'intera azione e la partecipazione ad alcune iniziative tecniche di scambio di informazione e di definizione di collaborazioni in ambito europeo nei vari gruppi di lavoro dai materiali fino ai sistemi per l'accumulo ibrido comprensivo dei supercondensatori. Si è inoltre partecipato ad una riunione del Comitato di gestione in coincidenza del Convegno Internazionale ISEECAP 2013, tenutosi ad Taormina a giugno 2013. In quell'occasione sono state illustrate alcune attività di ricerca dell'ENEA sulla caratterizzazione e sull'uso dei supercondensatori anche svolte all'interno della Ricerca di Sistema.

Partecipazione a N-ERGHY, il gruppo degli enti di ricerca europei aderenti alla Joint Undertaking Idrogeno e Celle a Combustibile (FCH-JU)

La FCH-JU è una partnership pubblico-privato promossa dalla CE e dall'industria europea per sostenere la ricerca, lo sviluppo tecnologico e la dimostrazione (delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile in Europa. Il suo scopo è quello di accelerare l'introduzione sul mercato di queste tecnologie, realizzando il loro potenziale per ottenere un sistema energetico a basso contenuto di carbonio. Membri della FCH JU sono la Commissione europea, le industrie raggruppate nel New Industry grouping e la comunità di ricerca raggruppata in N.ERGHY Research grouping, dove ENEA è membro del comitato di gestione.

Nell'ultimo anno, l'ENEA, tramite la partecipazione alla JU, ha contribuito e sta contribuendo alla definizione dei documenti di riferimento per il programma quadro "Horizon 2020". L'ENEA ha partecipato, nell'ambito di vari gruppi di lavoro, alla stesura della prima bozza del "Multi Annual Working Plan" (MAWP) e dell'"Annual Working Plan" (AWP) che definiscono rispettivamente le priorità per i prossimi sette anni (2014-2020) e i temi per la call 2014.

Partecipazione all'International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy (IPHE)

L'IPHE è stata fondata nel 2003 come un'istituzione internazionale per accelerare la transizione verso l'economia dell'idrogeno. L'IPHE è uno strumento per i partecipanti per organizzare, coordinare ed avviare collaborazioni a livello internazionali nei vari settori, dalla ricerca fino alla dimostrazione e utilizzazione commerciale dell'idrogeno e delle celle a combustibile. Dalla sua costituzione hanno aderito 16 paesi, tra cui l'Italia, che ha delegato esperti di diversi enti pubblici per assistere i Ministeri coinvolti (prevalentemente quello dell'Ambiente e quello dello Sviluppo Economico).

Nell'ultimo anno, l'ENEA ha partecipato ai lavori dell'IPHE, in qualità di componente del board degli enti di ricerca europei (N.ERGHY) e ha contribuito all'organizzazione e preso parte al convegno "IPHE Workshop - Hydrogen – A competitive Energy Storage Medium for large scale integration of renewable electricity", organizzato dalla CE che si è tenuto a Siviglia a novembre 2012.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Bologna, Dipartimento di Chimica “Giacomo Ciamician”

L'Università di Bologna ha collaborato con ENEA (Obiettivo a), concentrandosi su materiali catodici della famiglia delle olivine. In particolare i temi sviluppati dal Dipartimento di Chimica “Giacomo Ciamician” riguardano la prosecuzione della ricerca su nuovi materiali catodici per celle litio-ione, con l'ottimizzazione dei processi di preparazione di tali materiali e la loro caratterizzazione elettrochimica, ed il supporto all'ENEA alla progettazione e prova di celle complete da laboratorio.

Le attività si sono concentrate sullo sviluppo di catodi a base di LiMnPO_4 (eventualmente drogato), materiale a struttura olivina che deintercala/intercala ioni litio a 4,1 V vs. Li con una capacità teorica di 170 mAh/g. La combinazione dell'alto potenziale, che tuttavia non richiede l'uso di elettroliti speciali, e l'alta capacità fa prevedere un aumento consistente dell'energia specifica della batteria. Nel precedente anno l'Università di Bologna aveva già iniziato uno studio sul LiMnPO_4 , individuando un metodo di sintesi sol-gel partendo da precursori solubili, economico sia dal punto di vista energetico sia dal punto di vista dei costi, per l'ottenimento del materiale nanostrutturato. In questa annualità si è cercato di ottimizzare la sintesi di $\text{LiM}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$, dove M è un metallo (Fe o V) drogante.

Inoltre l'Università di Bologna ha realizzato due tipologie di batterie litio-ione di $\approx 1 \text{ cm}^2$ e carico elettrodico tale da assicurare una capacità di $\approx 1 \text{ mAh/cm}^2$ operanti in elettroliti a base di carbonati organici e sali di litio, entrambe con catodo a base di $\text{LiM}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$, e con anodi di grafite o ricevuto dall'Università di Camerino.

Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie

L'Università di Camerino (UNICAM) ha collaborato con ENEA (Obiettivi a e c) con attività di ricerca su due tipologie di batterie: le litio-ione e quelle redox al vanadio.

Per le attività relative a materiali anodici per batterie litio-ione di più elevata energia specifica è stata ottimizzata la preparazione di materiali compositi a base di grafene e Sn, Sb, Si. Particolare attenzione è dedicata all'ottimizzazione della morfologia dei materiali attivi (e in particolare delle matrici carboniose), agendo sulle procedure di sintesi, e delle formulazioni degli elettrodi, utilizzando binder quali carbosimetilcellulosa e acido poliacrilico alternativi al tradizionale poli-vinilidene fluoruro. Inoltre, è stato introdotto l'uso di additivi all'elettrolita quali il vinilene carbonato per la stabilizzazione dell'interfaccia elettrodo-elettrolita. Lo studio ha coperto tutte le fasi della realizzazione e della caratterizzazione dei compositi, dalla sintesi dei materiali attivi alla loro caratterizzazione chimica, morfologica e strutturale, dalla preparazione degli elettrodi alla loro caratterizzazione elettrochimica.

Sono stati ottenuti elettrodi compositi Sn/grafene e Si/grafene che forniscono valori stabili di capacità reversibile rispettivamente dell'ordine dei 600 mAh/g-1 e 1000 mAh/g, ampiamente superiori alla capacità fornita da anodi tradizionali a base di grafite (372 mAh/g).

Per la parte riguardante le batterie redox al vanadio, l'attività ha riguardato l'analisi sperimentale del comportamento di celle prototipali, fornite gratuitamente dal Gruppo Loccioni, per lo sviluppo di un modello puntuale della cella che permetta in ogni momento di intervenire sulle condizioni di esercizio del sistema attraverso un monitoraggio puntuale delle concentrazioni delle specie interessate. La ricerca ha usato metodi elettrochimici (misura di OCV) o spettrali (UV-Visibile), capaci in ogni momento di determinare lo stato di carica della cella. Inoltre l'attività sperimentale ha avuto anche lo scopo di valutare in via preliminare le potenzialità tecnologiche di questo sistema di accumulo.

Università di Palermo, Dipartimento Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM)

Il contributo dell'Università di Palermo ha riguardato le attività di ricerca contenute nell'Obiettivo b. Nel corso della prima fase, l'attività ha avuto la finalità di integrare fisicamente e funzionalmente nel sistema ibrido accumulo-FER un pacco batterie costituito da 250 celle al litio-ferro-fosfato (capacità di 20 Ah). A tal fine è stato necessario procedere all'ottimizzazione hardware e software degli apparati di interfaccia e comunicazione tra i controllori delle unità costituenti il sistema di *power conditioning*, l'unità di controllo del sistema di protezione d'interfaccia e di comunicazione verso la rete e il BMS delle batterie al litio. Più in particolare, rispetto all'attività svolta nella precedente annualità, è stato necessario integrare nel sistema il BMS (che allora non era disponibile), ottimizzando e perfezionando di conseguenza l'intero sistema di comunicazione e controllo dell'apparato.

Successivamente è stata svolta l'attività di sperimentazione in condizioni reali di funzionamento integrando il sistema sviluppato (comprendente il pacco-batterie al litio-ferro-fosfato per una capacità complessiva di 16 kWh e l'insieme degli apparati di interfaccia – di potenza e di segnale -di controllo e di protezione), in una rete elettrica di

distribuzione di bassa tensione attualmente in esercizio, al fine di verificare sperimentalmente sul campo l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione implementate.

Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII)

Le attività, svolte all'interno dell'obiettivo b, hanno previsto l'ottimizzazione della scheda elettronica di gestione e controllo inizialmente collocata in posizione verticale nella mezzeria del modulo tra le batterie e raffreddata tramite ventilatori disposti sul coperchio dell'involucro di contenimento del modulo, azionati dal BMS stesso.

Il DII si è occupato dello sviluppo del BMS completo, partizionato in due sezioni distinte e intercomunicanti, una a livello di modulo (quattro batterie al Li-FePO₄) ed una a livello di sistema (più moduli in serie), con funzione di bilanciamento di tipo attivo. In dettaglio, questa fase di sviluppo ha riguardato:

- un upgrade dell'hardware in modo da migliorare alcuni parametri funzionali della scheda elettronica BMS;
- la revisione del circuito utilizzato per la scheda elettronica, consistente nell'uso di un circuito multilayer (4 strati) e la riorganizzazione della disposizione dei componenti sullo stesso così da permettere il montaggio dei ventilatori e relativi driver a bordo della scheda elettronica BMS ed il fissaggio della stessa direttamente al coperchio dell'involucro;
- l'implementazione dell'uso di sensori termici NTC nella misura di uno per cella;
- l'introduzione della riconfigurazione dinamica attraverso l'impiego di esclusori ogni pacchetto di n (n = numero opportuno di) moduli e gestione degli stessi da parte del BMS che assume il ruolo di master del sistema batterie costituito da più moduli.

Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC)

L'Università di Pisa ha collaborato con l'ENEA, nell'obiettivo b, svolgendo due linee di attività parallele.

Dimensionamento, realizzazione e verifica sperimentale delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica

L'attività è consistita nel completamento della sperimentazione avviata nel precedente anno di attività, che vede la gestione del carico domestico mediante un sistema integrato di accumulo termico ed elettrico, con l'installazione di un sistema fotovoltaico da circa 2,5 - 3 kW integrato con accumulatori al litio di ridotta capacità energetica ed alta potenza erogabile per alimentare, mediante inverter da circa 4,5 kW, la rete di utenza domestica. Sono state registrate le grandezze elettriche nelle diverse sezioni di impianto, a valle del generatore fotovoltaico, a valle del sistema di accumulo e a valle dell'inverter per l'alimentazione del carico, nonché quelle di scambio in corrispondenza al confine con la rete pubblica. Sono state inoltre misurate le grandezze di temperatura e stato di carico dei sistemi di accumulo.

Individuazione delle sollecitazioni e criterio di dimensionamento di un accumulatore al litio inserito in una stazione di conversione di una tranvia metropolitana

Questa attività consiste nel definire le sollecitazioni a cui un sistema di accumulo elettrochimico, di tipo gestionale, è sottoposto durante il suo funzionamento in una sottostazione di alimentazione di una rete tranviaria.

Nello specifico si è utilizzato come caso studio la tranvia di Bergamo gestita dalla società TEB SpA. Sono stati analizzati i dati di misura forniti da TEB in merito alle potenze assorbite dalle sottostazioni di alimentazione della struttura tranviaria in funzione di diagrammi temporali di circolazione dei veicoli. È stata, quindi, simulata la struttura di alimentazione elettrica della tranvia e dei treni, nonché la gestione della movimentazione tramite le tracce orarie. È stata inoltre definita una logica di gestione dello stato di carica degli accumulatori al litio, quindi un criterio di dimensionamento della capacità energetica di accumulo.

L'analisi dei risultati di simulazione ha portato a definire i diagrammi corrente-tempo e potenza-tempo atti a indicare sollecitazioni tipo del sistema di accumulo per questo tipo di applicazione, ed il progetto preliminare di un sistema di accumulo da inserire in una sottostazione di alimentazione ritenuta più adatta per sviluppare successivamente la realizzazione e sperimentazione.

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

La valorizzazione energetica di biomasse di diversa natura (scarti, residui e reflui di produzioni agricole, allevamenti zootecnici e lavorazioni agroindustriali e la frazione organica dei rifiuti urbani), disponibili nell'ambito di un determinato territorio, può essere ottenuta in diversi modi e in particolare, con specifico riferimento alla produzione di energia elettrica su scala locale, mediante la digestione anaerobica (DA) delle biomasse fermentescibili per la produzione di biogas, mentre per quelle lignocellulosiche si può utilizzare la gassificazione per ottenere il cosiddetto syngas o la combustione diretta per trasferire l'energia contenuta nella biomassa ad un opportuno vettore energetico.

Sia il biogas che il syngas possono essere utilizzati in sistemi di piccola taglia distribuiti sul territorio (da qualche decina di kW al MW) per la generazione di elettricità e calore con sistemi basati sull'utilizzo di diversi cicli termici (motogeneratori, turbogeneratori, moduli ORC), mentre il biogas (e, in prospettiva, anche il syngas modificato nella composizione con uno specifico processo di metanazione), dopo opportuna purificazione ed upgrading, può essere immesso nella rete gas nazionale come biometano.

La produzione di biometano da immettere nella rete richiede, da un lato, l'ottimizzazione dei processi di digestione anaerobica, per aumentare la resa e la quota di metano prodotta, dall'altro lo sviluppo di sistemi di depurazione che consentano di ottenere il gas della qualità necessaria.

La diffusione di sistemi di generazione di piccola taglia richiede invece la disponibilità di impianti affidabili, di facile gestione e competitivi, da sviluppare attraverso l'ottimizzazione dei processi di produzione e purificazione del gas e l'integrazione tra i vari sottosistemi.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale dell'attività è quello di contribuire, in accordo con quanto previsto dal Piano Triennale 2012-2014, alla messa a punto e dimostrazione su scala significativa di sistemi per la valorizzazione energetica delle biomasse, sia mediante la produzione di biogas, da utilizzare per la co-generazione di elettricità e calore in sistemi decentralizzati di piccola-media taglia o, previo un opportuno trattamento di clean-up e upgrading, per l'immissione come biometano nella rete nazionale di distribuzione del gas, sia attraverso lo sviluppo di sistemi di cogenerazione pre-commerciali ad elevato rendimento basati sulla tecnologia della gassificazione (utilizzabili anche per la produzione di biocombustibili liquidi di sintesi) o della combustione in dispositivi innovativi per disporre in prospettiva di vettori energetici ad alta temperatura (caldaie a sali fusi), in grado di superare i 450 °C, anche associati con impianti solari termodinamici.

Si vuole inoltre cercare di ridurre i livelli di emissioni gassose relative a particolati fini di impianti di combustione di biomasse solide di piccola-media taglia, sia ottimizzando i processi di combustione, sia individuando nuovi sistemi di abbattimento basati su processi di rimozione catalitici dei suddetti inquinanti.

Molte attività in questo campo sono iniziate con un'enfasi maggiore sulla ricerca e sviluppo per l'impiego di biogas e syngas in celle a combustibile, ma, negli anni successivi, vi è stato un graduale spostamento dell'attenzione sulla produzione, clean-up ed upgrading dei gas derivanti da biomasse o rifiuti organici in sistemi avanzati, sia per migliorare il livello di affidabilità e di compatibilità ambientale di sistemi di conversione esistenti, sia per ampliare e diversificare gli usi finali (sistemi di generazione avanzati, nuove tipologie di biocombustibili).

La maggior parte delle attività svolte nell'ambito del PAR 2012 possono essere quindi considerate il proseguimento delle attività degli anni precedenti, con l'aggiunta di nuove volte ad ampliare il quadro delle tematiche oggetto di studio focalizzando l'attenzione su alcuni aspetti legati, come detto precedentemente, alla produzione di elettricità da biomasse lignocellulosiche con tecnologie convenzionali, ma sicuramente migliorabili per quel che riguarda più in particolare gli aspetti ambientali, o innovative, come le caldaie a sali fusi.

Sono stati realizzati e/o completati dispositivi e circuiti sperimentali di laboratorio e impianti pilota di scala significativa, con l'obiettivo specifico di verificare su una gamma più ampia di condizioni operative e su diverse

scale la fattibilità di processi e tecnologie oggetto di studio nel corso degli anni precedenti e, contemporaneamente, sono proseguite attività di ricerca di laboratorio e ne sono state avviate di nuove.

Parallelamente, sono proseguite le attività finalizzate allo sviluppo della piattaforma Web A.I.D.A. (che si interfaccia con il database dell'Atlante delle Biomasse realizzato dall'ENEA nel primo anno dell'AdP 2006-2008), realizzata allo scopo di permettere la valutazione dei potenziali di biomasse su base territoriale a differenti livelli, e all'upgrading del relativo sistema di consultazione, rendendo la navigazione Web più veloce e intuitiva e con la possibilità di personalizzazione del livello di interrogazione e l'inserimento di un database che riporti le caratteristiche delle biomasse più importanti al fine del loro utilizzo in processi termochimici o biochimici e, soprattutto, i parametri chimico-fisici delle biomasse meno investigate o di nuovo utilizzo.

L'ottimizzazione dei sistemi di produzione di biogas è stata perseguita mediante lo studio e lo sviluppo dei processi di pretrattamento per ampliare la tipologia di biomasse utilizzabili e ridurre i tempi di permanenza nei reattori biologici di quelle più difficilmente degradabili per l'elevato contenuto in cellulosa e lignina, velocizzando i processi fermentativi e, attraverso lo sviluppo e sperimentazione su impianto pilota - come il digestore modulare mobile da 6 m³ realizzato in precedenza - di sistemi biologici in grado di incrementare la resa di metano partendo da diverse tipologie di biomasse/rifiuti, soprattutto di origine agricola ed agroindustriale, opportunamente miscelati (co-digestione).

Sono state di conseguenza valutate su una scala significativa le potenzialità produttive di nuove miscele da avviare alla DA, rappresentative delle diverse tipologie di biomasse maggiormente disponibili sul territorio nazionale più promettenti dal punto di vista della semplicità di reperimento e gestione e/o della resa energetica, quali ad esempio rifiuti o materiali di scarto (FORSU, deiezioni animali, scarti e rifiuti agroalimentari e delle lavorazioni agroindustriali ecc.) e colture non alimentari utilizzabili per la produzione di biogas come, ad esempio, il topinambur.

In tale contesto sono state inoltre avviate attività di studio e sperimentazione di sistemi per la produzione di microalghe, da inserire a valle del processo di DA, al fine di definire le condizioni operative da adottare per ottenere i migliori risultati in termini di resa energetica, economici ed ambientali, valutare la riduzione del contenuto in nutrienti, soprattutto azotati, degli effluenti liquidi e massimizzare la produzione di biomassa algale da riciclare nei digestori.

Il tema della produzione di biometano di qualità adatta all'immissione in rete è stato affrontato potenziando le attività sullo sviluppo di sistemi di depurazione (clean-up) per abbattere i contaminanti e quelle sui processi di separazione della CO₂ (fuel upgrading) contenuta nel biogas.

In particolare, da un lato sono stati approfonditi gli studi sulla rimozione dell'H₂S, iniziati nel secondo anno dell'AdP 2006-2009, con la messa a punto di nuovi materiali sia per i processi di semplice assorbimento che per quelli di conversione chimica (catalizzatori strutturati), mentre dall'altro sono state affrontate le problematiche aperte per la separazione della CO₂ dal metano, con l'obiettivo di realizzare sistemi efficienti ed efficaci, anche per quantità di gas da trattare relativamente basse.

Nello specifico, oltre ad una sperimentazione su impianto pilota relativa ai sistemi di separazione della CO₂ basati sull'impiego di membrane, sono state avviate attività di ricerca su sistemi innovativi di rimozione della CO₂ dal biogas basati sull'utilizzo di ammine in soluzione organica con rigenerazione a bassa temperatura (processo mutuato da precedenti attività sulla CCS) e sulla formazione di idrati.

In parallelo, sono state portate avanti le attività di studio di processi di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di particolari tipologie di biomasse cellulosiche ad elevato tenore di umidità (fanghi di depurazione, biomassa algale ecc.) e implementata la ricerca e sperimentazione sui processi per la produzione di metano a partire dal syngas ottenuto dalla gassificazione di biomasse lignocellulosiche, utilizzando in una prima fase un reattore da banco a letto fisso, realizzato nel terzo anno del precedente AdP, per arrivare, sulla base dei dati sperimentali ottenuti, alla realizzazione di un reattore pilota per la produzione di gas naturale di sintesi (SNG) con un processo a stadi adiabatici, da accoppiare ad uno degli impianti di gassificazione disponibili presso il Centro ENEA della Trisaia.

E' stata infine avviata una nuova linea di attività finalizzata alla ricerca e sviluppo di sistemi cogenerativi innovativi di piccola-media taglia (caldaie a sali fusi ad alta temperatura associate a cicli termici operanti sia con vapore d'acqua che con fluidi organici) basati sulla combustione di biomasse lignocellulosiche, da accoppiare con nuovi dispositivi catalitici per la riduzione degli inquinanti organici presenti nei fumi sviluppati in collaborazione con l'Università di Salerno e la Società FN S.p.A. e testati su una linea sperimentale dedicata realizzata presso il Centro ENEA di Saluggia.

L'attività si articola in quattro obiettivi, corrispondenti a tre diverse linee di ricerca ed una linea specifica per le attività di supporto ai Ministeri e le collaborazioni internazionali.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili

Le attività relative a questo obiettivo hanno riguardato in particolare:

- lo sviluppo di software dedicato (Piattaforma Web A.I.D.A.) per valutazioni di prefattibilità economica di impianti di cogenerazione a biogas e, in prospettiva, mediante gassificazione di biomasse lignocellulosiche;
- i processi di digestione anaerobica alimentati con diverse miscele di matrici organiche, inclusi substrati ad elevato contenuto di materiale lignocellulosico e colture algali, anche per incrementarne la produzione in metano e/o idrogeno;
- i processi di produzione di microalghe con il trattamento e il condizionamento della frazione liquida del digestato;
- la produzione di syngas mediante gassificazione di biomasse ad elevato contenuto di umidità con acqua in condizioni supercritiche (SCW).

a.1 Aggiornamento e implementazione della piattaforma Web A.I.D.A.

L'attività iniziata a partire dal trasferimento della piattaforma sul server ENEA della Casaccia, avvenuta a settembre 2012, ha comportato:

- ulteriori verifiche e test di funzionalità della piattaforma;
- verifica e controllo dei risultati di calcolo tramite simulazioni diversificate;
- raccolta di indicazioni e suggerimenti da utenti selezionati per modifiche e/o integrazioni;
- risoluzione di errori di visualizzazione e calcolo;
- inserimento di nuove funzionalità ed informazioni per l'utenza.

Dopo trasferimento della piattaforma Web A.I.D.A. presso sul server ENEA è iniziata una fase di test e di collaudo tecnico a cura dell'ENEA e del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II al fine di monitorare la funzionalità della stessa [rapporto RdS/2013/280].

Nel dicembre 2012 è stato organizzato un seminario "A.I.D.A. uno strumento web per l'analisi di fattibilità di impianti a biomasse" presso ENEA Casaccia per diffondere ai tecnici e ricercatori ENEA esperti del settore i risultati ottenuti e le prestazioni del sistema implementato ed i partecipanti sono stati invitati a far pervenire osservazioni e consigli per migliorare il servizio offerto.

Dai riscontri pervenuti e dalle simulazioni numeriche eseguite per testare la piattaforma online è stato individuato un elenco di aggiornamenti da effettuare distinti per 3 tipologie di categorie cui è stato associato un diverso grado di priorità:

- verifica del calcolo e dei risultati numerici a video;
- verifica delle funzionalità del software;
- verifica di usabilità.

Queste ultime hanno comportato:

- inserimento di nuove voci di glossario;
- inserimento sezione "contatti" e sezione "aggiornamenti";
- inserimento sezione "Visualizzazione" con informazioni su compatibilità, ottimizzazione, software con il quale è stato realizzato.

Successivamente, lo strumento software è stato ulteriormente implementato mediante:

1. modifiche e controlli sul calcolo della producibilità di biogas da FORSU in associazione ad altre biomasse;
2. modifiche di alcune variabili di calcolo e semplificazione di alcuni passaggi;
3. valutazione della possibilità di apportare modifiche più ampie al fine di consentire di salvare i dati di input inseriti dall'utente;
4. aggiornamento ed ampliamento database matrici fermentescibili.

In Figura 83 è mostrata la schermata Web della piattaforma (<http://aida.casaccia.enea.it/ida/default.asp>). Sono evidenziate alcune voci nuove della finestra "info" recentemente ampliate. Per alcune delle attività sopra elencate (2, 3) è stato valutato e pianificato il lavoro da svolgere in termini di entità di impegno in quanto alcune richiedono, se saranno ritenute necessarie e desiderate dall'utenza, una modifica profonda di alcuni parti dell'architettura del software che necessita di una riscrittura di parti consistenti del codice software della piattaforma.

E' stato avviato e realizzato l'aggiornamento del calcolo del potenziale territoriale di alcune biomasse residuali lignocellulosiche al fine di fornire agli utenti informazioni circa l'evoluzione del potenziale lordo e disponibile di biomasse. L'analisi è stata realizzata per le biomasse residuali agricole erbacee ed arboree ed i risultati sono stati prodotti e resi disponibili sul sito di AIDA come mappe e set di tabelle di dati regionali basati sui dati statistici ISTAT 2011. Il calcolo è stato realizzato tramite la medesima metodologia di calcolo esplicitata nel progetto "Atlante nazionale delle biomasse". Tale aggiornamento in un'ottica di servizio all'utenza dovrebbe essere reso continuo e realizzato, per tutte le biomasse comprese originariamente in Atlante, con un maggior dettaglio a scala territoriale.



Figura 83. Schermata WEB della piattaforma A.I.D.A

a.2 Sperimentazione su impianto pilota di processi di codigestione di differenti miscele di matrici organiche

Sperimentazione della produzione di biogas con l'impianto pilota DMM6000

Nel corso della presente annualità è stata completata la realizzazione della linea sperimentale per l'alimentazione del digestore modulare mobile da 6 m³ (DMM6000), collocato presso il Centro Ricerche ENEA della Casaccia nel corso dell'annualità precedente, la misurazione dei volumi di biogas prodotto e l'analisi della sua composizione. Il sistema è stato realizzato con un elevato grado di automazione per permettere la gestione dell'impianto pilota 24 h su 24 h.

Di conseguenza, è stato possibile mettere in funzione l'impianto, alimentandolo con rifiuti organici provenienti dalla mensa del Centro, ed avviare il processo di digestione anaerobica della biomassa, ricavandone i primi dati sperimentali [rapporto RdS 2013/277].

Il DMM6000, in grado di produrre fino a 500 litri/ora di biogas, è stato sviluppato con l'obiettivo di effettuare sperimentazioni con mix innovativi di biomasse e/o di batteri e provare, testandone l'efficacia con una alimentazione costituita da biogas reale, diversi processi e tecnologie di clean-up e di upgrading, in modo da ottenere un biocombustibile gassoso "pulito", utilizzabile per la generazione di energia elettrica o per alimentare sistemi per la produzione di biometano.

Per la realizzazione e messa in funzione dell'impianto pilota di digestione anaerobica, sono state definite alcune sezioni di impianto che svolgono operazioni specifiche sul materiale di alimentazione o in uscita dal processo. In particolare, sono state individuate:

1. una sezione di lavorazione del materiale grezzo (preliminarmente costituito dagli scarti alimentari della mensa del Centro ENEA della Casaccia) che deve produrre una miscela acquosa, con solidi sospesi e finemente tritati;
2. una sezione di accumulo, termostatazione ed omogeneizzazione della soluzione organica acquosa prodotta;
3. una sezione di carico automatizzata dell'alimentazione organica;
4. il digestore DMM6000, completo della relativa guardia idraulica;
5. il sistema di misura del biogas prodotto (temperatura, portata, composizione);
6. il sistema di trattamento del biogas (deumidificazione, desolfurazione, up-grading).

L'attività svolta ha riguardato l'installazione della linea di alimentazione e la messa in esercizio del digestore, e quindi le sezioni progettate e realizzate sono quelle che vanno dalla 1 alla 5.

La biomassa grezza viene caricata in una tramoggia realizzata in acciaio inox, con una bocca di carico di 70 x 60 cm ed un foro di uscita in basso del diametro di 40 mm, cui è stato collegato un tritratore di tipo domestico. Le prove preliminari hanno dimostrato che per produrre quantitativi rilevanti (dai 100 litri/giorno in su) di una miscela di carica omogenea sarà necessario pretrattare in loco la biomassa con un tritratore industriale, così da alimentare il tritratore già installato con del materiale già parzialmente sminuzzato in modo da evitare di sottoporlo ad uno sforzo eccessivo. Durante la triturazione viene aggiunta una quantità di acqua tale da ottenere la concentrazione di materiale solido richiesta.

Il materiale, che si accumula in un serbatoio di alimentazione, costituito da un cubo di 1 m di lato (capacità utile circa 1.000 litri) realizzato in materiale plastico rinforzato con nervature metalliche per permetterne la movimentazione coi mezzi specializzati, è mantenuto ad una temperatura prefissata, così da rallentare la

fermentazione aerobica esterna al digestore. Una pompa ad immersione è posta nel serbatoio per movimentare la miscela e renderla quanto più omogenea possibile ed evitare la stratificazione del materiale.

Per il caricamento al digestore è sufficiente azionare la pompa di carico, che aspira la soluzione attraverso una valvola a tre vie e la fa passare attraverso una valvola di non ritorno, posta sulla linea di alimentazione allo scopo di impedire che la pressione all'interno del digestore provochi ritorni di liquido al serbatoio.

Il trituratore è attivabile mediante un apposito interruttore, mentre dal quadro elettrico fornito con il digestore, opportunamente modificato, è possibile attivare, oltre ai sistemi di gestione del digestore, anche la pompa ad immersione e quella di carico.

Di fatto, il sistema di gestione della soluzione di carico e dell'acqua a valle del serbatoio di alimentazione è un po' più complesso per permettere varie operazioni utili all'esercizio del sistema (riciclo della miscela con la pompa esterna, invio di acqua nel serbatoio, utilizzo diretto dell'acqua, lavaggio della pompa, scarico esterno della miscela dal serbatoio). In particolare, a valle della pompa è stata inserita una valvola di sovrappressione, per proteggere la pompa stessa nel caso che la valvola di ingresso del digestore fosse tenuta inavvertitamente chiusa.

La miscela di alimentazione è caricata nel digestore DMM6000 (Figura 84), dove avviene la fermentazione anaerobica con produzione di biogas e digestato.

Il digestore consiste di un serbatoio coibentato, riscaldato elettricamente con un circuito ausiliario ad acqua, e nel cui interno la biomassa è movimentata da un agitatore. Oltre alla valvola di ingresso è predisposta una valvola di scarico nella parte più bassa, per permettere il completo svuotamento del serbatoio. Sul fianco sono installati tre misuratori di temperatura e tre valvole per il prelievo di biomassa.

Il biogas, raccolto nella parte alta del digestore, è convogliato mediante tubazione nella sottostante guardia idraulica, utile a mantenere stabile la pressione nel serbatoio. La guardia idraulica è costituita da un cilindro di acciaio inossidabile avente diametro 27 cm ed altezza complessiva pari a 60 cm. La quota utile di controllo del livello del liquido all'interno del serbatoio è di 50 cm. La guardia idraulica è dotata di indicatore di livello a vista tramite tubicino di vetro comunicante con l'interno dell'apparecchiatura, di bocchelli laterali per ingresso e uscita acqua e di bocchelli per entrata e uscita del gas proveniente dal digestore, posizionati sulla flangia superiore.

Sulla linea di ingresso ed uscita dalla guardia idraulica sono state inseriti alcuni strumenti utili alla caratterizzazione del gas prodotto (misurazione di pressione, temperatura, concentrazione e portata del gas uscente dal digestore), che costituiscono la sezione 5 dell'impianto. A valle della sezione di misura il gas è al momento scaricato direttamente in atmosfera. La sezione di trattamento del biogas (sezione 6) sarà progettata e realizzata in una fase successiva del progetto.

La messa in esercizio del digestore DMM6000 è stata effettuata ponendosi nelle condizioni operative indicate dal costruttore al fine di individuare una condizione di lavoro stabile e di riferimento per le prove successive. In particolare, la temperatura del riscaldamento del digestore, la cui misura è rilevata da una termocoppia posta nella parte inferiore del serbatoio, è stata fissata al valore di 37 °C, tipica della digestione anaerobica mesofilica.

L'altro parametro della gestione del DMM6000 è la frequenza e durata dell'attivazione del miscelatore che è stata fissata, mediante il timer interno presente nel quadro di controllo, per una movimentazione della biomassa della durata di 2 min ogni 5 min.

Per quanto riguarda la gestione dell'alimentazione della biomassa nel digestore, i tempi e la frequenza di alimentazione sono stati fissati con la logica di alimentare in maniera continua una quantità limitata di biomassa (al fine di ridurre i tempi della lavorazione, attualmente manuale, dei residui alimentari forniti dalla mensa della Casaccia). Si è così stabilito di alimentare il digestore ogni 6 ore per 15 secondi, così da avere un quantitativo giornaliero di 26 litri (portata nominale della pompa).

Infine l'azione di rimescolamento nel serbatoio di carico, dopo alcune prove tese ad individuare il numero minimo di azionamenti (così da ridurre l'effetto negativo dell'aerazione della biomassa, ma cercando di mantenere una



Figura 84. Digestore pilota DMM6000

miscela quanto più omogenea possibile), ha portato ad alimentare la pompa ad immersione per 5 min ogni 90 min.

In Tabella 21 sono riportati i parametri di regolazione del processo di digestione, eventualmente da modificare nel corso di successive sperimentazioni per studiarne l'effetto sul processo fermentativo.

Tabella 21. Parametri di regolazione del processo di DA nel digestore DMM6000

Parametro	valore
Temperatura del riscaldamento del digestore	37 °C
Miscelatore: durata e frequenza	2 min ogni 5 min
Alimentazione della biomassa (26 l/min): durata e frequenza	15 s ogni 6 h
Rimescolamento nel serbatoio di carico: durata e frequenza	5 min ogni 90 min

Il biogas prodotto dal digestore, attualmente analizzato prelevandone periodicamente campioni mediante gas bag e sottoponendoli ad analisi strumentali in laboratorio, sarà in futuro inviato, dopo essere stato opportunamente condizionato, ad uno strumento analitico "on line" per determinarne la composizione e studiare come questa vari al variare della qualità di alimentazione del digestore e delle condizioni di processo.

Uno strumento di analisi biogas è composto da diverse celle di misura, una per ogni componente del biogas, quindi essenzialmente una per CH₄, una per CO₂, una per O₂ ed una per H₂S. Opzionali sono quella per la misura di H₂, CO ed NH₃. Le due celle per la misura di CH₄ e CO₂ sono celle dotate di rivelatori ad infrarossi (NDIR), mentre quelle per la lettura di O₂ e H₂S sono celle elettrochimiche (EC).

Prima di arrivare alle celle di misura, il biogas deve essere condizionato per eliminare l'umidità tramite filtri o, in caso di gas saturo, tramite un chiller a cella peltier. Completano lo strumento due pompe, una per il campionamento e una per la rimozione della condensa. Sono opzionali diversi sensori per determinare le condizioni operative del gas, un sensore (ed eventualmente regolatore) di pressione, un sensore di temperatura e di portata. Lo strumento deve essere calibrato per i diversi gas di interesse. Il sistema di analisi del biogas è stato acquisito.

La prima campagna sperimentale con il DMM6000 è stata avviata utilizzando un inoculo misto proveniente da due diversi impianti di fermentazione anaerobica: una parte, circa 2 m³, da un altro impianto sperimentale della stessa tipologia utilizzato, dalla fine del 2012 e durante i primi mesi del 2013, per la sperimentazione su scala pilota della produzione di biogas da colture di topinambur (attività descritta in dettaglio nelle pagine seguenti), ed altri 2 m³ dal primo stadio di un impianto di biogas alimentato a deiezioni animali e scarti vegetali in funzione presso un'azienda agricola di Nepi (VT).

La biomassa per l'alimentazione utilizzata in questa prima fase di avvio è costituita da scarti organici (FORSU) provenienti dalla mensa del Centro Casaccia. Il materiale prima di ogni carico viene pesato, sottoposto a macinazione, con contemporanea aggiunta di una quantità equivalente di acqua di rete, e stoccato in un contenitore. La quantità della sostanza secca nella biomassa iniziale variava tra il 16 e il 25% in peso.

La sostanza secca presente nel serbatoio di alimentazione oscilla tra il 4,1 e l'8,9%, come mostrato nel grafico in Figura 85. La determinazione della sostanza secca viene fatta per perdita di peso, riscaldando un campione di biomassa a 105 °C per 24 ore.

In questa prima fase di avvio, per consentire un'adeguata acclimatazione della biomassa microbica, si è alimentato il DMM6000 con una quantità minima di substrato, tale da determinare un tempo di ritenzione molto lungo. Periodicamente è stato misurato il rapporto acidità/alcalinità (FOS/TAC) nel digestato per verificare il regolare andamento del processo di fermentazione. L'acidità è misurata in mg di acido acetico equivalente e l'alcalinità in mg di carbonato di calcio per litro. Valori di 0,3-0,5 indicano un buon processo fermentativo in corso, valori inferiori a 0,2 indicano un carico

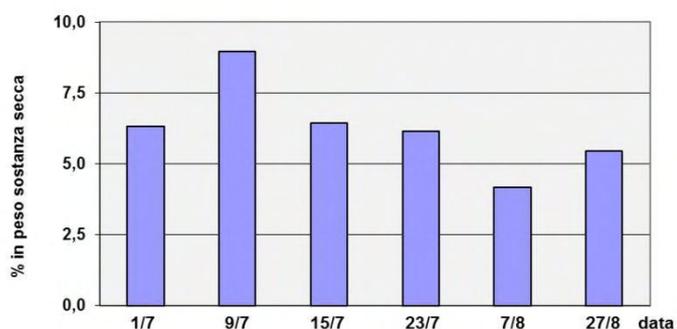


Figura 85. Contenuto di sostanza secca nell'alimentazione dell'impianto

organico troppo basso. I valori misurati sono stati costantemente minori di 0,15, confermando le condizioni di sottoalimentazione del digestore.

La produzione di biogas è stata costantemente monitorata. In Figura 86 è riportata la velocità di produzione del biogas espressa in litri/minuto.

Sono state effettuate analisi del biogas, che hanno confermato la presenza di metano ed anidride carbonica. Nel grafico riportato in Figura 87 sono riportate le concentrazioni di metano e CO₂ espresse in percentuale in volume del gas. Le elevate percentuali di metano indicano chiaramente che il processo è nella fase di start-up. A regime, la quantità di metano nel biogas dovrebbe attestarsi tra il 55 e il 65% in volume.

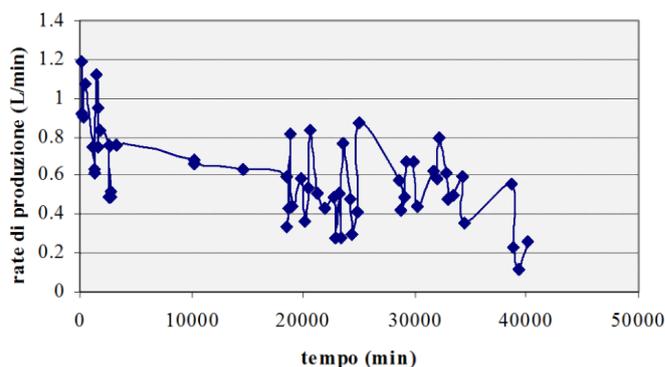


Figura 86. Volume di biogas prodotto nel tempo

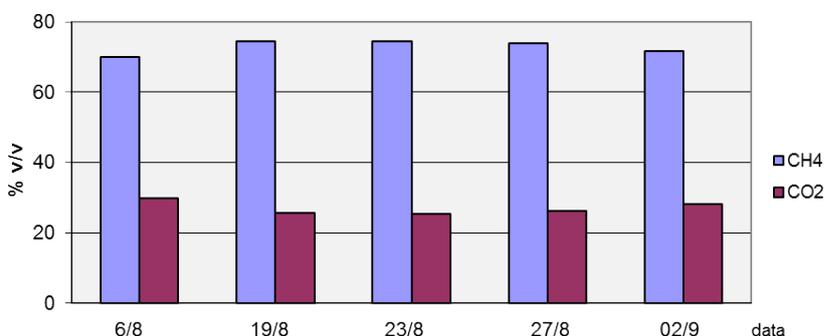


Figura 87. Composizione del biogas prodotto

Il lavoro svolto nell'ambito della presente linea di attività nel corso nell'annualità è consistito principalmente nella progettazione, realizzazione e allestimento dell'apparato sperimentale necessario alla messa in esercizio dell'impianto pilota DMM6000, con l'obiettivo di realizzare una piattaforma sperimentale integrata caratterizzata da un elevato grado di automazione, in grado di assicurare il funzionamento del sistema 24 ore su 24.

Le analisi del biogas e della biomassa in fermentazione evidenziano che, alle condizioni operative date, il processo si sta consolidando. Una volta raggiunto, con incrementi programmati della sostanza secca alimentare, lo stato stazionario, il sistema sarà pienamente funzionante e utilizzabile per future attività di ricerca e sviluppo di innovazione tecnologica sulla produzione e l'upgrading del biogas.

Produzione di biogas da colture di topinambur

Fra le attività da svolgere nell'ambito del PAR 2012 sui sistemi di produzione di biocombustibili, era prevista la sperimentazione sull'impianto pilota DMM6000 di processi di codigestione anaerobica di differenti miscele di matrici organiche fra cui, per il notevole interesse nell'ottica del recupero e riqualificazione produttiva di terreni agricoli abbandonati e, più in generale, terreni marginali e/o degradati, biomasse prodotte da colture dedicate no-food, con particolare riferimento al topinambur (*Heliantus tuberosus* L.).

Di conseguenza, l'attività proposta prevedeva l'uso della biomassa proveniente da prove colturali realizzate dall'ENEA nell'ambito di altri programmi di ricerca sulla coltivazione e conservazione del topinambur (parte aerea, sottoposta ad essiccazione naturale o insilata, previa triturazione, in modo analogo a quanto comunemente fatto con il mais) al fine di verificarne l'idoneità all'impiego per l'alimentazione di un impianto pilota di taglia significativa per la produzione di biogas, evidenziando e superando i problemi posti da un simile passaggio di scala rispetto alle prove di biometanazione e fermentazione in reattori di laboratorio, che avevano peraltro dato risultati molto positivi.

L'indisponibilità dell'impianto pilota DMM6000 per la realizzazione di una campagna sperimentale di durata significativa, hanno portato alla decisione di utilizzare per le suddette prove un altro impianto, denominato DMM2000, più piccolo di quello collocato presso il Centro ENEA della Casaccia, ma del tutto analogo a questo per tipologia e modalità di funzionamento, che era stato precedentemente collocato dall'ENEA presso la discarica di Cupinoro (Bracciano, Roma) per la realizzazione di prove sperimentali di produzione di biogas da FORSU.

L'impianto in oggetto, realizzato precedentemente al DMM6000 e utilizzato a suo tempo come modello per la progettazione e realizzazione di quest'ultimo, ha un volume utile di 2 m^3 ed opera con un processo "ad umido" (come la maggior parte dei digestori anaerobici attualmente in funzione in Italia e in Europa), cioè con un contenuto di sostanza secca nell'alimentazione inferiore al 10% in peso, ed è in grado di produrre oltre 150 litri/ora di biogas. Essendo dotato, come il DMM6000, di un circuito esterno autonomo di termostatazione, è in grado di operare sia in mesofilia che in termofilia. Una foto dell'impianto è riportata in Figura 88.

La biomassa in alimentazione deve essere preventivamente triturrata ed omogeneizzata con acqua prima di procedere all'immissione nell'impianto. Il corpo del digestore è dotato di 3 termocoppie per il controllo della temperatura, poste a varie altezze rispetto al livello del contenuto, di cui una è collegata tramite PLC al sistema di termostatazione a camicia di fluido riscaldato. Sono presenti inoltre tre punti di prelievo del campione in corrispondenza delle termocoppie. Nel fondo del digestore sono posizionati il motore dell'albero dell'agitatore interno e due valvole a saracinesca utilizzate per l'immissione dell'alimentazione e per lo svuotamento del DMM2000. Il biogas fuoriesce da una bocchetta posta nella parte superiore del digestore e, dopo essere convogliato in un sistema di guardia idraulica per garantire l'assenza di contatto con l'atmosfera, passa in un contatore volumetrico per la misura.



Figura 88. Impianto DMM2000 presso la discarica di Cupinoro (Bracciano, Roma)

La campagna sperimentale [rapporto RdS/2013/123] avviata nel mese di novembre 2012, è stata realizzata utilizzando come biomassa fusti di topinambur provenienti da prove colturali realizzate dall'ENEA presso lo stesso sito di Cupinoro. Una miscela della parte aerea di 8 diverse varietà di topinambur, raccolta nella fase di maggiore accumulo di zuccheri (e lasciando i tuberi in campo per la produzione dell'anno successivo) è stata triturrata con un triturratore in grado di ridurre il materiale secco alle dimensioni di circa 1 cm, dimensione ritenuta sufficiente per l'impiego diretto, o, tramite passaggi successivi, in frammenti di dimensioni più ridotte.

La laboriosità della fase di preparazione della razione ha fatto sì che il digestore venisse alimentato a giorni alterni, e ogni 3-4 giorni in occasione dei fine settimana e/o di festività. Questo regime di alimentazione, unito ad alcuni problemi strutturali del digestore, ha determinato il funzionamento dello stesso in condizioni di assoluta sottoalimentazione. Per confronto, si consideri che un tipico digestore da 1 MW alimentato con liquami suini e silomais adotta correntemente un livello di carico organico di $3 \text{ kg SV/m}^3/\text{giorno}$, contro un valore massimo di 1,1 raggiunto nella sperimentazione in oggetto.

Il sistema di termostatazione non ha suscitato grandi preoccupazioni, riuscendo a mantenere la temperatura di lavoro nel range $37\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$ per quasi tutta la durata della sperimentazione (novembre-aprile). La mancanza di un sistema di registrazione delle temperature (che venivano rilevate direttamente dagli addetti alla sperimentazione in occasione dell'alimentazione dell'impianto) non ha tuttavia consentito di rilevare l'escursione giorno-notte.

In Figura 89 è riportata la produzione media giornaliera di biogas, espressa in metri cubi di biogas prodotto per tonnellata di sostanza secca introdotta nel digestore. Dall'analisi dei dati di produzione, rilevati ad ogni carico del digestore su un normale contatore del gas, l'aspetto più evidente è l'andamento oscillante della produzione, la cui origine si sarebbe forse potuta indagare variando il regime dell'alimentazione.

Inizialmente si è adottato un carico di 6 kg di topinambur secco, che aveva un buon contenuto di sostanza volatile (SV), che è la parte fermentescibile della biomassa, pari al 90,9% del peso secco totale. In questa fase il carico organico introdotto corrispondeva a $1,13 \text{ kg SV/m}^3/\text{giorno}$ e una parte del separato liquido del digestato veniva

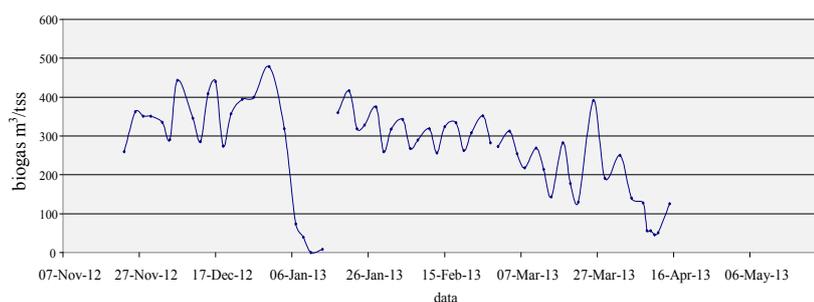


Figura 89. Produzione media giornaliera di biogas dell'impianto pilota DMM2000 ($\text{m}^3 \text{ biogas/t}_{\text{sostanza secca}}$)

ricircolata nel sistema per mantenere un pH alcalino. In queste condizioni, la produzione di biogas è arrivata a valori massimi di 1 m³/giorno.

A parte la riduzione del carico da 6 a 4 kg di topinambur secco, corrispondenti a 0,75 kg SV/m³/giorno, adottata nel periodo natalizio, un guasto al contatore del gas ha determinato un crollo della produzione rilevata. Con la riparazione del guasto e la ripresa del carico organico più sostenuto il sistema ritornava a produrre intorno a 0,7-0,8 m³/giorno di biogas. Il passaggio all'alimentazione con insilato, per quanto graduale, ha determinato una riduzione netta di sostanza organica nell'alimentazione, a causa dell'elevata umidità di tale substrato, con conseguente diminuzione della produzione giornaliera di biogas, che si è attestata intorno a 0,4 m³/giorno.

All'inizio di aprile, considerata ormai esaurita la sperimentazione, al fine di verificare l'origine dell'andamento oscillante della produzione di biogas, si è voluto tentare una variazione del regime alimentare, effettuando un carico giornaliero dell'impianto.

Purtroppo, a questo punto, si è avuto un incremento troppo rapido del rateo di carico organico, e ciò ha determinato l'arresto del processo di fermentazione per over-load del sistema. Nella Figura 90 si vede chiaramente l'incremento dell'acidità, dovuta agli acidi grassi volatili (VFA), che causa una rapida caduta del pH portando il rapporto FOS/TAC (rapporto fra acidi organici totali e capacità di tamponamento alcalina, espressa in mg CaCO₃/L) oltre il range di stabilità del digestore (0,2 ÷ 0,3) inibendo l'intero processo. Una maggiore gradualità nell'operazione avrebbe probabilmente consentito di mantenere sotto controllo i parametri di processo (pH, concentrazione degli acidi organici, FOS/TAC ecc.) evitando l'arresto della produzione di biogas.

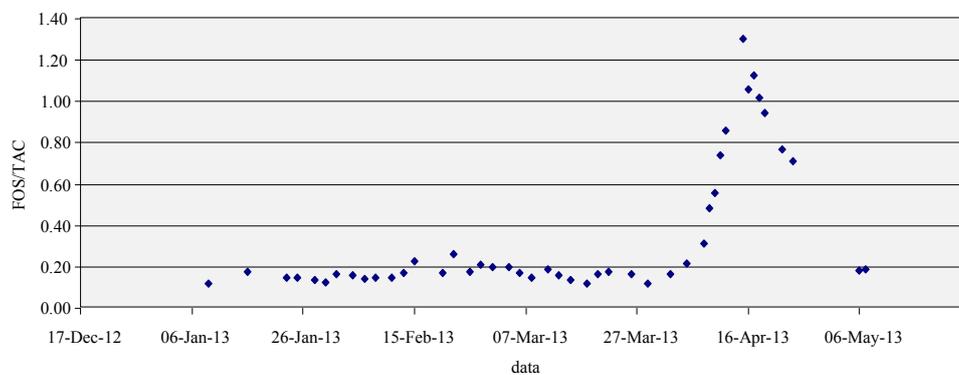


Figura 90. Variazione del rapporto FOS/TAC nel digestato dell'impianto pilota DMM2000 durante il 2013

Per valutare l'efficienza del processo di digestione, oltre a calcolare la produzione specifica di biogas per tonnellata di sostanza secca (m³ biogas/t s.s.) immessa nell'impianto, si è valutato il potenziale energetico del digestato in uscita dall'impianto. Dalle prove effettuate è risultato che il separato solido del digestato ha ancora un notevole potenziale produttivo (450 m³/t s.s.).

Si è inoltre verificata la percentuale di degradazione della frazione volatile della sostanza secca (la parte fermentescibile della biomassa) tra ingresso ed uscita del digestore, che si è attestata intorno al 62%.

Parallelamente alla sperimentazione sul digestore, per valutare la funzionalità dell'impianto ed avere dei valori di riferimento e confronto, sono state condotte in laboratorio prove di produzione potenziale di biogas delle matrici utilizzate (topinambur fresco, essiccato ed insilato) e dei reflui del digestore stesso (digestato, separato in liquido e solido).

L'analisi dei risultati evidenzia che l'insilaggio può portare ad una leggera riduzione del potenziale produttivo (da 670 a 450-550 m³/t s.s.), tanto maggiore quanto più è lungo il periodo di conservazione della biomassa sottoposta a questo trattamento. In sostanza, la conservazione tramite insilaggio dei fusti di topinambur ha evidenziato una perdita del potenziale energetico di circa il 30% dopo 6 mesi, che si può fissare come termine ultimo per un utilizzo conveniente di questa coltura a fini energetici.

Per la prima volta in assoluto, una sperimentazione di digestione anaerobica su un impianto pilota di taglia dell'ordine dei metri cubi è stata condotta con il topinambur, dimostrando la fattibilità di un processo di produzione di biogas (e, quindi, in prospettiva, di energia e/o biocombustibili) da questa pianta resistente ed estremamente adattabile, che si presta ad essere coltivata in terreni marginali o di scarso valore per l'agricoltura tradizionale, con bassa richiesta di manodopera, fertilizzanti, acqua ed energia.

Come conseguenza delle problematiche emerse nel corso della sperimentazione (necessità di macinazione fine, formazione di croste in testa al digestore dovuta al non adeguato sistema di agitazione interno, impossibilità di una alimentazione costante) si è ottenuta un'efficienza globale del processo inferiore rispetto alle aspettative.

I valori di produzione di biogas (m^3 biogas/t s.s.) rilevati sull'impianto si attestano intorno a 1/2 - 2/3 del teorico, dato confermato dall'ancora elevato potenziale produttivo del digestato in uscita dal DMM2000. Si sono comunque acquisite utili informazioni sulle modalità di trattamento del topinambur in questo tipo di impianti ed è probabile che sperimentazioni successive, effettuate sull'impianto pilota della Casaccia (che consente una migliore agitazione del digestato ed un controllo costante dell'alimentazione e dei parametri di processo), anche in co-digestione con altre tipologie di biomasse e rifiuti organici, forniranno informazioni più accurate sulla reale potenzialità di impiego a fini energetici di questa coltura.

Aspetti microbiologici del processo di digestione anaerobica

Al fine di studiare e comprendere meglio la dinamica della comunità microbica durante la fermentazione del topinambur per la produzione di biogas, sono stati effettuati prelievi sia dal substrato utilizzato per l'alimentazione dell'impianto pilota che dal digestato. I campioni, del volume di circa 35 mL ciascuno, sono stati prelevati settimanalmente per un periodo di 10 settimane a partire dal terzo mese dall'inizio del processo di fermentazione, come riportato in Tabella 22.

Tabella 22. Schema dei prelievi effettuati durante le prove di produzione di biogas da topinambur su impianto pilota

Data campionamento	Alimentazione del digestore
Settimana 1	Topinambur secco
Settimana 2	Topinambur secco
Settimana 3	Topinambur secco / insilato (1:1)
Settimana 4	Topinambur secco / insilato (1:4)
Settimana 5	Topinambur insilato
Settimana 6	Topinambur insilato
Settimana 7	Topinambur insilato
Settimana 8	Topinambur insilato
Settimana 9	Topinambur insilato
Settimana 10	Topinambur insilato

Per caratterizzare la comunità microbica è stato utilizzato un approccio sperimentale indipendente dalla coltivazione dei batteri, che prevede l'impiego della tecnica molecolare Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE), una tecnica impiegata per la separazione di frammenti di DNA che differiscono nella sequenza nucleotidica anche di una sola coppia di basi. Infatti, nella DGGE, che viene condotta in presenza di denaturanti chimici, i frammenti di DNA di pari peso molecolare si separano in base al pattern di denaturazione.

Da ciascun campione è stato estratto il DNA genomico totale e, successivamente, circa 20 ng di questo DNA sono stati amplificati tramite PCR con primerspecifici per il gene che codifica per la subunità ribosomiale 16S (16S rDNA) sia dei batteri che degli archaea.

Poiché il bioreattore, durante l'ultimo periodo del processo di fermentazione (circa 8 settimane), è stato alimentato con topinambur insilato, è stata verificata anche l'eventuale presenza di specie batteriche appartenenti al genere *Clostridium*, e in questo caso il controllo è stato effettuato mediante l'amplificazione del gene che codifica per la subunità *hydA* dell'enzima [FeFe]-idrogenasi, utilizzando come materiale di partenza sia il topinambur insilato usato per l'alimentazione dell'impianto che i campioni di digestato prelevati con cadenza settimanale.

La scelta di un gene funzionale come target molecolare dipende dal fatto che il gene 16S rDNA, comunemente utilizzato per studi di caratterizzazione delle comunità microbiche, non è sufficiente per distinguere le diverse specie del genere *Clostridium*.

L'analisi della composizione della comunità microbica mediante DGGE ha evidenziato come entrambe le comunità dei batteri e degli archaea (Figura 91 e 92) subiscono forti variazioni, soprattutto nelle prime settimane di fermentazione (campioni 1, 2, 3, 4).

In seguito, alla sostituzione del topinambur secco con quello insilato come alimentazione per la fermentazione (campioni 5, 7, 8, 9, 10) le due comunità microbiche tendono a stabilizzarsi, anche se un'analisi più approfondita dei due gel DGGE rivela differenze significative. In particolare, la diversità, misurata mediante il numero di bande presenti in ciascun profilo DGGE, è in generale maggiore nella comunità degli archaea rispetto a quella dei batteri, inoltre, la diversità di questi ultimi aumenta nel tempo, mentre quella degli archaea mostra una chiara tendenza opposta.

E' interessante notare che anche i due substrati (topinambur secco e insilato) si differenziano tra di loro per quanto riguarda la composizione delle due comunità microbiche. D'altronde, al passaggio da topinambur secco a topinambur insilato corrisponde anche una diminuzione del pH del digestato, dovuto probabilmente ad una variazione nella composizione della comunità microbica. Attualmente sono in corso esperimenti riguardanti il sequenziamento di bande prelevate dai gel DGGE al fine di definire l'appartenenza a taxa microbici specifici.

Per quanto riguarda la presenza di batteri appartenenti al genere *Clostridium*, solo in due campioni di digestato corrispondenti alle settimane in cui il bioreattore è stato alimentato con topinambur insilato è stata rilevata una banda di amplificazione con i primers specifici per il gene *hydA*.

Ovviamente, il risultato di queste analisi ha un valore puramente indicativo, e non fornisce informazioni sulla maggiore o minore "sicurezza" dell'uso di colture di topinambur per la produzione di biogas rispetto ai substrati di più comune impiego. Sarà pertanto necessario condurre ulteriori esperimenti con altri substrati, a parità di condizioni operative, per valutare quantitativamente la popolazione di questa specifica comunità microbica e analizzare la composizione.

a.3 Sviluppo e sperimentazione di processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno

Sperimentazione della digestione anaerobica in impianto pilota a doppio stadio

L'attività di ricerca ha avuto il duplice obiettivo di effettuare lo scaling-up del processo di produzione di idrogeno e metano dalla scotta, sviluppato nel corso della precedente annualità dell'AdP, e di verificarne la sostenibilità in continuo [rapporto RdS/2013/183].

A tale scopo, presso i laboratori dell'Unità UTRINN BIO nel Centro ENEA della Casaccia, è stato progettato e assemblato un impianto pilota a doppio stadio del volume di circa 50 litri (Figura 93). Alcune specifiche tecniche per il reattore a metano sono state modificate nel corso dell'attività.

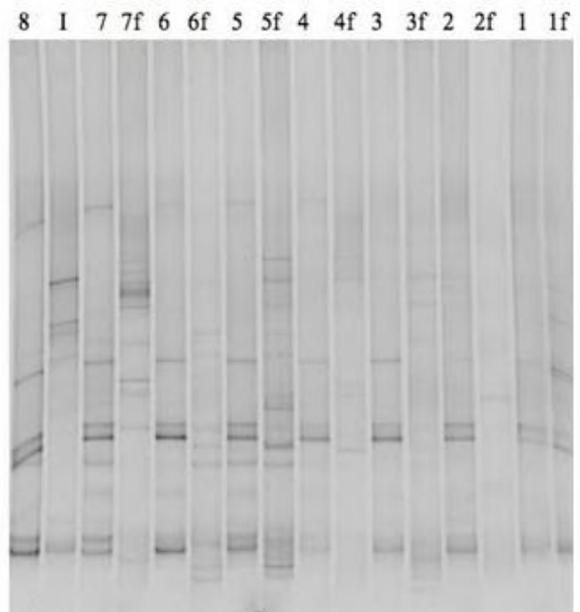


Figura 91. DGGE della comunità dei batteri presente nei campioni di digestato (settimane 1-8), inoculo (I) e substrato utilizzato per l'alimentazione (1f, 2f, 3f, 4f, 5f, 6f, 7f)

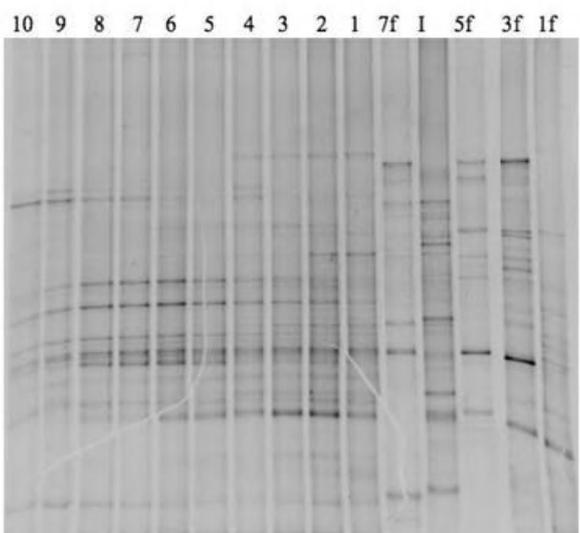


Figura 92. DGGE della comunità degli Archaea presente nei campioni di digestato (settimane 1-10), inoculo (I) e substrato utilizzato per l'alimentazione (1f, 3f, 5f, 7f)

Una prima parte dell'attività è stata svolta con la finalità di valutare la potenziale produzione di solo metano in un processo in continuo, a concentrazioni crescenti di scotta, un refluo ad alte concentrazioni di lattosio (40 - 50 g/L), debolmente acido (pH 4,8 -5,6) e quindi teoricamente non idoneo per i microrganismi produttori di metano.

Da questi primi e parziali risultati emergono delle indicazioni interessanti:

- la produzione di metano da scotta da processi sia a singolo che a doppio stadio, è un processo fattibile (Figura 94);
- La produzione di idrogeno migliora la qualità del biogas nel secondo stadio in termini percentuali di metano e sebbene l'effluente del 1° stadio abbia un pH intorno a 4,3 - 4,5, nel 2° stadio il pH si mantiene su valori di circa 7, confermando che la separazione della fase idrolitica/acido genica da quella metanogenica migliora l'efficienza energetica del processo di produzione di metano;
- I risultati della produzione di idrogeno e metano dalla scotta aprono delle buone prospettive sulla produzione di idrometano. La composizione volumetrica media del biogas (%) alla convergenza dei due flussi era di $5,5 \pm 4,6$ per l' H_2 e di $59 \pm 5,5$ per il CH_4 (Figura 95).



Figura 93. Impianto pilota di DA a doppio stadio

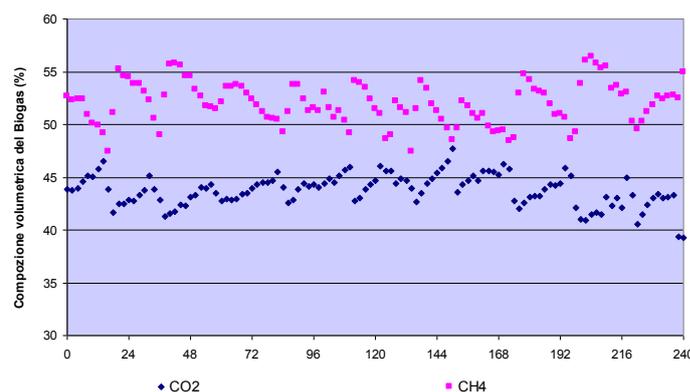


Figura 94. Composizione volumetrica del biogas (%) da scotta t.q. (lattosio 54,7 g/L) (dati dal 6-18 giugno 2013)

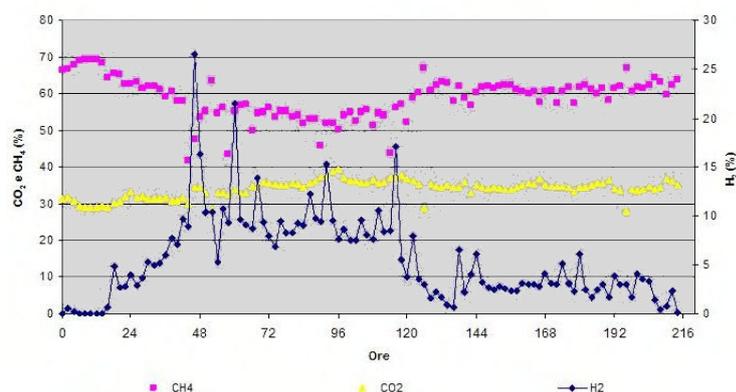


Figura 95. Composizione volumetrica del biogas (%) da scotta (10 g/l lattosio) alla confluenza dei flussi del reattore I e II (3-12 settembre 2013)

Dalle prove sperimentali sono stati ottenuti $0,78 \text{ NL } CH_4/L$ giorno, flussi medi di biogas di $50,5 \pm 4,8 \text{ mL/min}$ e un contenuto di metano del $52 \pm 2\%$. I dati sono stati raccolti durante una sperimentazione durata 12 giorni con un tempo di ritenzione (HRT) di 16,7 giorni.

I risultati di produzione di idrogeno e metano dalla scotta t.q. sono stati molto inferiori rispetto a quelli ottenuti in batch nelle sperimentazioni precedenti (PAR 2011) che, tuttavia, sono state effettuate con scotta diluita (5 g/L).

Sono stati ottenuti 0,09 NL H₂/L giorno, flussi medi di biogas di 1,35 ± 1 mL/min. e un contenuto di idrogeno del 15%. Per la fase a metano sono state ottenute produzioni di 0,53 NL CH₄/L, flussi medi di biogas di 40 ± 4 mL/min e un contenuto di metano del 47 ± 3%.

La sperimentazione è tuttora in corso e avrà come principali obiettivi:

- la stabilizzazione della fase di produzione di idrogeno tramite l'acquisto di un controllo automatico del pH;
- test in batch per la produzione di idrogeno e metano in termofilia.

Studio della sintrofia batterica nei processi di digestione anaerobica mediante tecnica FISH (Fluorescence In Situ Hybridization)

Le produzioni di bioidrogeno e biometano sono il risultato di complesse interazioni e cooperazioni tra gruppi funzionali di batteri per molti aspetti ancora poco note, soprattutto nell'ambito della fase di metanogenesi. Per questo si è lavorato alla messa a punto della tecnica FISH (Fluorescence In Situ Hybridization) al fine di poter condurre indagini filogenetiche sulla composizione delle comunità microbiche del primo e del secondo stadio del reattore ENEA nelle differenti fasi della digestione anaerobica e per correlare i parametri chimici di processo con la composizione delle comunità, senza dover procedere all'allestimento di colture, procedura particolarmente difficoltosa soprattutto per i metanigeni (*Archea*).

Grazie all'impiego di sonde oligonucleotidiche è possibile determinare la morfologia e l'abbondanza di microrganismi non coltivati, di analizzare la loro distribuzione spaziale in situ, nonché di monitorare le dinamiche di popolazioni microbiche nell'ambiente grazie all'impiego di sonde oligonucleotidiche a rRNA marcate con un fluorocromo. La metodologia è particolarmente efficace poiché la quantità di rRNA riflette le varie fasi di sviluppo dei microrganismi e le prove effettuate hanno dimostrato la possibilità di applicarla per rintracciare all'interno dei reattori taxa di batteri di particolare interesse negli studi di DA (Figura 96).

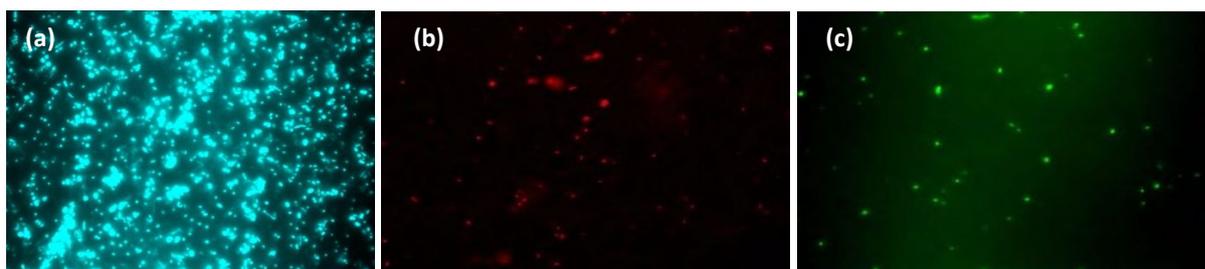


Figura 96. Immagini in microscopia (100x) relative alla comunità microbica del reattore a metano: a), per la conta totale delle cellule batteriche marcate con DAPI; b) Archea (sonda Arch 915 marcato con indocarbocianina - CY3); c) Eubacteria (sonde EUB 338, I, II, III marcate con fluoresceina FLUO)

La tecnica FISH applicata all'impianto pilota di produzione di idrogeno e metano si è dimostrata un valido strumento di indagine filogenetica sulle comunità microbiche attive nel processo di digestione anaerobica (Tabella 23). Come si può osservare, la composizione della comunità microbica all'interno del reattore a idrogeno resta sostanzialmente simile a quella dell'inoculo di partenza, seppur registrando valori più bassi. Nel reattore a metano la percentuale degli eubatteri scende dal 69,4 a 49,7, ma la riduzione dei due gruppi, dominanti all'interno del reattore a idrogeno, è rilevante. Ciò indica che altri organismi appartenenti ai gruppi degli eubatteri sono divenuti dominanti. Le prossime indagini saranno perciò rivolte ad applicare altre sonde per individuare quei gruppi di batteri sintrofici nella coesistenza con i metanogeni e funzionali alla produzione di metano. Inoltre, solo nel reattore a metano vengono individuati segnali positivi per le sonde degli Archea.

Tabella 23. Percentuale di batteri positivi per ogni sonda utilizzata rispetto al numero totale di cellule rilevate con la colorazione DAPI nell'inoculo F210 e nel reattore I e II

	Archea	Eubatteri	Alpha-proteobatteri	Gamma-proteobatteri	Enterobacteriaceae
F210	-	77,0 ± 4,6	42,0 ± 5,1	20,0 ± 2,3	10,0 ± 4,0
Reattore a H ₂	-	69,4 ± 4,0	33,3 ± 4,2	18,1 ± 1,5	2,5 ± 0,7
Reattore a CH ₄	9,9 ± 1,5	49,7 ± 3,4	9,0 ± 3,9	1,4 ± 0,7	0,8 ± 0,1

Caratterizzazione funzionale del consorzio microbico GCL per la produzione di idrogeno da glicerolo grezzo

Nelle attività sperimentali svolte è stato approfondito il ruolo delle diverse comunità individuate nell'inoculo GCL nella produzione di idrogeno ed etanolo da glicerolo grezzo.

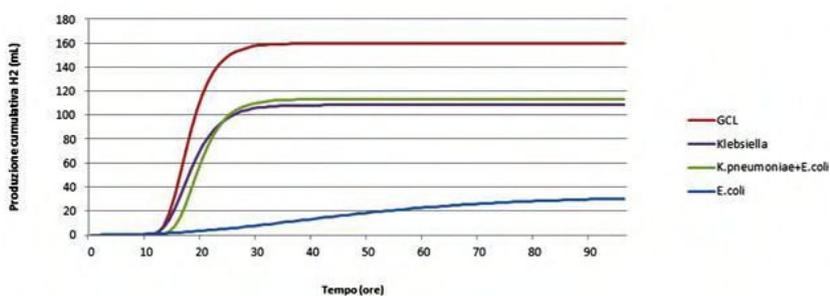
L'inoculo GCL è stato selezionato da un fango attivo attraverso una procedura di arricchimento stringente e diretta sul substrato (glicerolo grezzo) e senza l'aggiunta di altre fonti di carbonio. Successivamente, l'inoculo in oggetto è stato utilizzato per ottimizzare la fermentazione anaerobica di diverse tipologie di glicerolo attivo dopo ripetuti passaggi di arricchimento sul glicerolo. Da tale procedura di arricchimento è risultato un inoculo specializzato nella fermentazione del glicerolo grezzo, che produce idrogeno ed etanolo con buone rese pari, rispettivamente, a $0,80 \pm 0,01$ moli di H_2 /moli di glicerolo e $0,83 \pm 0,02$ moli di EtOH/moli di glicerolo, e con una comunità microbica che coopera metabolicamente a tale fine. Questa comunità è risultata essere caratterizzata da un gruppo dominante e polimorfico di enterobatteri idrogeno produttori (*Klebsiella* ed *Escherichia*) e non (*Shigella*) ed una popolazione meno rappresentativa e filogeneticamente più distante, appartenente al genere *Cupriavidus*.

Per approfondire e chiarire il ruolo delle diverse comunità individuate nell'inoculo GCL, nel corso delle attività svolte sono state effettuate ulteriori indagini seguendo due approcci sperimentali:

- la diluizione progressiva dell'inoculo GCL, fino alla massima diluizione che ancora conservava la sua "funzionalità", e, parallelamente, la caratterizzazione molecolare della comunità microbica per individuare l'unità biologica di base in grado di mantenere invariata la funzione target, ossia la capacità di produrre idrogeno ed etanolo;
- la "ricostruzione" dell'inoculo GCL riunendo insieme le diverse comunità, precedentemente isolate, e valutando i parametri di fermentazione al variare della composizione dell'inoculo "ricostruito" rispetto all'inoculo GCL tal quale. Poiché all'interno di un consorzio microbico tra i ceppi presenti si vengono a creare dei meccanismi di cooperazione e/o competizione, le prove di fermentazione condotte con i ceppi puri hanno avuto lo scopo di chiarire l'entità di tali meccanismi e di stimare i limiti e le potenzialità dell'impiego, per una fermentazione anaerobica ottimale, di un consorzio microbico piuttosto che dei singoli ceppi.

Le prove sperimentali svolte allo scopo di identificare la composizione minima della comunità microbica capace di conservare la funzione target (produzione di etanolo ed idrogeno) hanno dimostrato che l'inoculo GCL conserva la sua funzionalità anche nelle diluizioni più spinte. La composizione dell'inoculo, caratterizzata mediante DGGE, si conserva inalterata per quanto riguarda le comunità di idrogeno-produttori *Klebsiella* ed *Escherichia*, che conservano il loro polimorfismo e subiscono delle fluttuazioni nella composizione intraspecifica. Anche *Cupriavidus* si conserva nella comunità, mentre *Shigella* scompare.

Dal confronto di tutte le prove sperimentali effettuate nell'ambito di questa linea di attività emerge che l'inoculo GCL tal quale ha mostrato le rese più alte sia in termini di produzione di idrogeno che di etanolo, confermando ancora una volta l'efficacia dell'arricchimento e dell'ottimizzazione dei parametri del processo di fermentazione (Figura 97).



Inoculo	P_{max} [mL]	R_{max} [mL/h]	λ [h]	R^2
GCL	160,1168	19,24	13,34636	0,999961
<i>K.pneumoniae</i>	108,702	11,46619	13,13444	0,999164
<i>E.coli</i>	32,7972	0,552949	15,21348	0,998556
<i>K.pneumoniae</i> + <i>E. coli</i>	113,5875	13,20774	15,06254	0,999916

Figura 97. Curve cumulative della produzione di idrogeno nelle prove sperimentali di ricostruzione dell'inoculo. In tabella i valori dei parametri dell'equazione modificata di Gompertz dei vari esperimenti: P_{max} = produzione potenziale massima; R_{max} = tasso massimo di produzione; λ = fase lag; R^2 = coefficiente di correlazione tra dati sperimentali e teorici

La spiegazione di questo risultato va ricercata nel fatto che il consorzio microbico GCL utilizza pathway metabolici diversi, la cui sinergia è evidente poiché l'efficienza di produzione di idrogeno e di etanolo delle singole comunità (*Klebsiella* ed *Escherichia*) è inferiore a quella dell'inoculo ricostruito (*Klebsiella* + *Escherichia*) e del GLC tal quale.

I risultati ottenuti permettono di affermare che la procedura di arricchimento utilizzata per selezionare un inoculo efficiente alla produzione di idrogeno ed etanolo da un substrato complesso come il glicerolo grezzo (che contiene anche un certo quantitativo di impurità come il metanolo, i detergenti, etc.), è una metodologia valida e potenzialmente utilizzabile per l'ulteriore sviluppo di questo processo.

Produzione di idrogeno e metano da scarti e residui agro-alimentari

Uno studio sperimentale sulla produzione combinata di idrogeno e metano da substrati organici biodegradabili attraverso un processo innovativo di digestione anaerobica a due stadi è stato condotto presso laboratorio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale della Sapienza Università di Roma con l'obiettivo specifico di investigare l'influenza delle condizioni operative sulla stabilità del processo, valutare l'effetto delle caratteristiche del substrato, eventualmente inoculato con biomassa, sulle rese di conversione in H₂ e CH₄, nonché di individuare le condizioni per un eventuale trasferimento di scala del processo [rapporto RdS/2013/278].

Nell'ambito della sperimentazione sono state considerate diverse tipologie di substrati organici biodegradabili, e in particolare i residui organici dalla preparazione industriale di alimenti e piatti surgelati, assimilabili dal punto di vista qualitativo alla frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU), anche in comparazione con un substrato liquido (siero di latte) proveniente dal settore lattiero-caseario.

I risultati ottenuti, confermando ed approfondendo ulteriormente quanto già ottenuto nei precedenti anni, hanno consentito di individuare una serie di condizioni di massima per il trasferimento del processo investigato a piena scala, e di chiarire l'importanza di numerosi fattori ai fini dell'ottimizzazione delle rese del processo di fermentazione.

Nonostante il fatto che il processo sia ad oggi ancora ad uno stadio sperimentale e richieda ulteriori approfondimenti ai fini del miglioramento delle rese di produzione del biogas, in particolare attraverso l'analisi sperimentale di tecniche volte a migliorare ulteriormente la biodegradabilità dei residui, appare tuttavia evidente che la separazione degli stadi della digestione anaerobica è in grado di dar luogo ad un netto aumento delle rese di conversione del substrato.

Ai fini della produzione biologica di idrogeno per via fermentativa, il presente studio ha evidenziato la fondamentale importanza, a parità di caratteristiche del substrato, dell'aggiunta di un inoculo (nel caso specifico fanghi di supero provenienti da impianti di depurazione di reflui civili), sebbene l'effetto di tale aggiunta risulti indipendente dalle quantità dosate. Per quanto concerne quest'ultimo aspetto, la produzione di idrogeno appare confrontabile in corrispondenza di rapporti substrato/inoculo pari rispettivamente a 90/10 e 45/55, come mostrato in Tabella 24, che riporta i risultati di prove effettuate rispettivamente su una miscela di FORSU (costituita da scarti di mensa) inoculata con fanghi di depurazione e FORSU tal quale.

Tabella 24. Rese specifiche in bio-H₂ ottenute nel corso delle prove di digestione anaerobica di FORSU

	MIX 1 (Substrato: Inoculo = 45:55 p/p)		
	pH 6	pH 6,5	pH 7
NL H ₂ /kg SV ₀ (*)	50,47	44,59	32,28
NL H ₂ /kg SV _{FORSU} (**)	63,75	61,48	46,37
NL H ₂ /kg TOC ₀	93,57	85,79	62,91
	MIX 2 (Substrato: Inoculo = 90:10 p/p)		
	pH 6	pH 6.5	pH 7
NL H ₂ /kg SV ₀ (*)	52,08	59,39	35,56
NL H ₂ /kg SV _{FORSU} (**)	69,28	78,17	37,72
NL H ₂ /kg TOC ₀	93,84	104,00	62,19
	MIX 3 (100% in peso di substrato)		
	pH 6	pH 6.5	pH 7
NL H ₂ /kg SV ₀ (*)	---	---	---
NL H ₂ /kg SV _{FORSU} (**)	43,8	46,34	10,58
NL H ₂ /kg TOC ₀	81,1	81,67	20,27

(*) SV iniziali della miscela; (**) SV iniziali della sola FORSU

Ciò suggerisce che nei contesti territoriali nei quali la domanda di trattamento dei fanghi di supero da impianti di depurazione delle acque reflue non risulti soddisfatta, possano essere utilmente conseguite opzioni di co-smaltimento di residui organici di diversa provenienza, con evidenti ricadute positive sull'efficienza e l'efficacia dei sistemi di gestione dei rifiuti.

E' opportuno sottolineare come il pH risulti un parametro di rilevanza fondamentale che, a parità di condizioni operative, e in particolare della composizione della miscela, risulta in grado di condizionare in modo significativo le rese del processo di digestione.

Altro aspetto rilevante è rappresentato dalla correlazione tra produzione di idrogeno e metaboliti prodotti, in quanto questi risultano un indice dei percorsi metabolici prevalenti, a loro volta influenzati da parametri operativi, quali la pressione parziale di idrogeno ed il potenziale redox, oltre che il pH, la regolazione dei quali rappresenta il fattore chiave ai fini della massimizzazione delle rese di produzione.

Mediante la digestione della FORSU e di rifiuti agro-industriali è possibile ottenere buone rese di produzione di idrogeno. E' tuttavia a tal fine necessario esplorare ulteriormente le condizioni operative ottimali per ottenere ulteriori possibili miglioramenti del processo, e valutare eventuali benefici derivanti dal pretrattamento del substrato.

Per quanto riguarda la produzione di metano, le rese energetiche ottenute negli esperimenti di digestione anaerobica condotti nel corso del presente studio sono risultate sempre confrontabili con quelle documentate in altri studi disponibili nella letteratura scientifica, dimostrando la validità del sistema sperimentale ed il buon controllo dei parametri operativi effettuato.

I rendimenti di produzione di metano ottenuti dalle prove di digestione eseguite su siero vaccino risultano incrementati di circa il 20% nel caso di utilizzo del doppio stadio se confrontati ai valori ottenuti nella digestione convenzionale, e dai bilanci energetici di massima eseguiti (riferiti ad un impianto di digestione anaerobica collocato presso un caseificio) si evince l'opportunità di introdurre il primo stadio idrogenogenico per incrementare la produzione energetica netta del processo, come evidenziato dai dati riportati in Tabella 25.

Tabella 25. Caratteristiche dei reattori, produzioni specifiche di biogas e copertura del fabbisogno energetico derivante dall'uso del biogas calcolati per un impianto di classe C2 situato presso un caseificio

	Impianto di classe C2, con una produzione di 66,5 t/giorno di siero					
	Singolo stadio			Doppio stadio		
Nm ³ H ₂ /giorno	-			282		
m ³ reattore H ₂	-			87		
Nm ³ CH ₄ /giorno	1.424			1.725		
Generatore	MCI	TAG	MCFC	MCI	TAG	MCFC
kWe (H ₂)	-	-	-	-	-	15
kWe (CH ₄)	201	195	277	244	236	336
% fabbisogno elettricità	39	38	54	48	46	66
% fabbisogno termico	27	20	19	32	24	23
t CO ₂ /anno evitate	1.703	1.413	1.655	2.063	1.712	2.005

Si sottolinea inoltre che l'introduzione di uno stadio per la produzione di bio-idrogeno a monte di un digestore anaerobico convenzionale non richiede grandi volumetrie, né particolari dispositivi da abbinare ai reattori rispetto a quelli tradizionalmente utilizzati per la sola produzione di metano, ad eccezione di un sistema automatizzato di controllo del pH.

Come già solo in parte evidenziato nel corso delle precedenti annualità, i risultati ottenuti suggeriscono l'approfondimento dello studio della co-digestione di diverse tipologie di residui, alcuni anche con funzione di apporto di biomassa, poiché essa, sebbene richieda una maggior capacità di gestione ed un'approfondita conoscenza del processo anaerobico, favorisce il miglioramento delle rese energetiche specifiche del processo soprattutto in presenza di substrati velocemente fermentescibili, ottimizza le caratteristiche fisico-chimiche della miscela di alimentazione, permette di raggiungere più facilmente la stabilità del processo rispetto alla digestione semplice di un substrato complesso, permette di diluire carichi organici eccessivi e picchi di concentrazione di sostanze inibenti, consente la stabilizzazione di residui di attività agro-industriali prodotte stagionalmente, favorisce la realizzazione di impianti decentralizzati per la produzione di energia, consentendo un buon ritorno economico dell'investimento anche per piccole realtà agro-industriali.

a.4 Prove sperimentali di pretrattamenti chimico-fisici o biologici di substrati con elevato contenuto di materiale lignocellulosico

La frazione solida del digestato prodotto da impianti a biogas tradizionali, con 40 giorni di tempo di ritenzione ed alimentati al 100% con vegetali (insilati o scarti di lavorazione di prodotti agricoli), è composta per la quasi totalità da polisaccaridi (lignina, cellulosa ed emicellulosa). Poca differenza, circa il 70% della composizione, si trova nei digestati con alimentazione mista liquami - biomasse vegetali. Questo dimostra che gran parte del potenziale energetico della biomassa utilizzata per la produzione del biogas non è utilizzato, e quindi una scarsa efficienza complessiva del trattamento.

Considerato che in Europa si producono circa 300 milioni di tonnellate/anno di digestato, si comprende quanto sia importante trovare metodi efficaci per un pretrattamento idrolitico delle biomasse o per una migliore utilizzazione degli stessi sottoprodotti.

Gli studi già intrapresi nella scorsa annualità dell'AdP, mirati a rendere i substrati lignocellulosici, ma anche quelli chitinici, più idonei alla fermentazione batterica per la produzione di idrogeno, sono proseguiti su 3 linee di ricerca:

- idrolisi fungina e produzione di idrogeno da scarti ad elevato contenuto di lignina e/o chitina,
- isolamento e sviluppo di funghi anaerobi da rumine bovino,
- idrolisi di substrati cellulosici mediante autofermentazione batterica.

Idrolisi fungina e produzione di idrogeno da scarti ad elevato contenuto di lignina e/o chitina

Sono proseguite le attività di studio dell'idrolisi dei substrati - pioppo, abete, paglia, chitina - mediante attacco fungino in ambiente aerobico utilizzando funghi "white-rot". L'efficacia dell'idrolisi veniva di volta in volta accertata tramite la successiva produzione di idrogeno per fermentazione anaerobica.

L'attacco fungino dei substrati è stato realizzato dall'Università della Tuscia [rapporto RdS/2013/235], mentre i test di fermentazione sono stati effettuati nei laboratori dell'ENEA, inoculando il consorzio microbico F210, ed instaurando condizioni anaerobiche.

I risultati più salienti (Tabella 26) sono stati ottenuti sulla base di un disegno fattoriale pianificato presso l'Università della Tuscia per lo studio dell'attività idrolitica del ceppo fungino *Lecanicillium muscarium* CCFEE 5003 sul substrato chitina, propedeutica alla produzione di idrogeno e metano. La chitina è stata scelta come substrato per la sperimentazione perché costituisce uno scarto abbondante e problematico da smaltire dell'industria agroalimentare, soprattutto di quella del trattamento dei prodotti ittici.

Tabella 26. Produzione di H₂ e CH₄ dal substrato chitina dopo attacco fungino di *Lecanicillium muscarium*

Prova	Chitina (g/L)	Estratto di lievito (g/L)	% H ₂ a 504 ore	mL/LH ₂ a 504 ore	% CH ₄ a 312 ore	mL/L CH ₄ a 312 ore
N1	5	0,1	1,2	55	13	735
N2	30	0,1	1,9	95	13,2	695
N3	5	5	3,0	145	11,4	640
N4	30	5	3,2	105	30,4	2.600
N5	5	1,73333	0,9	40	22,5	1.465
N6	30	3,36667	2,1	100	20,4	1.290
N7	13,3333	0,1	2,7	130	13,3	700
N8	21,6667	5	2,2	110	38,13	3.935
N9	17,5	2,5	-	-	-	-
N10	17,5	2,5	2,6	125	19,97	1.190
N11	17,5	2,5	1,9	90	11,38	590
N12	17,5	2,5	2,5	120	13,32	725

Isolamento e sviluppo di funghi anaerobi dal rumine bovino

I funghi anaerobi costituiscono un settore di ricerca nuovo a livello internazionale, potenzialmente di notevole interesse come agenti biologici di processi che richiedono la degradazione di materiale lignocellulosico. Essi sono dotati di enzimi fibrolitici, principalmente xylanasi e cellulasi, con attività specifica più elevata di quella rilevata per i funghi aerobici ed hanno inoltre un ciclo vitale più rapido.

Se queste due peculiarità li rendono potenzialmente interessanti per la fase di idrolisi, le tecniche per la loro coltivazione, manipolazione e impiego, di contro, sono ancora poco note e la letteratura in merito è scarsa. Inoltre, proprio perché i funghi anaerobi costituiscono un tema nuovo di ricerca, non è stato possibile reperire questi microrganismi presso le ceppoteche commerciali europee. Ci si è rivolti allora a ricercatori di altri Paesi e, nell'ambito di una collaborazione internazionale, due ceppi fungini di *Neocallimastix sp.* ed *Orpinomyces sp.* sono stati forniti, insieme ad informazioni approfondite sulle tecniche di lavoro adottate per la loro coltivazione dalla Kahramanmaras Sutcu Imam University (Turchia).

Le attività svolte finora sono state mirate alla definizione del protocollo di isolamento sia da striscio di organo, sia da reflui zootecnici, al mantenimento dei ceppi fungini, preservandoli dalla contaminazione batterica (principalmente Archea), e alla messa a punto delle tecniche di microscopia per la visualizzazione e la raccolta delle immagini (Figure 98 e 99).

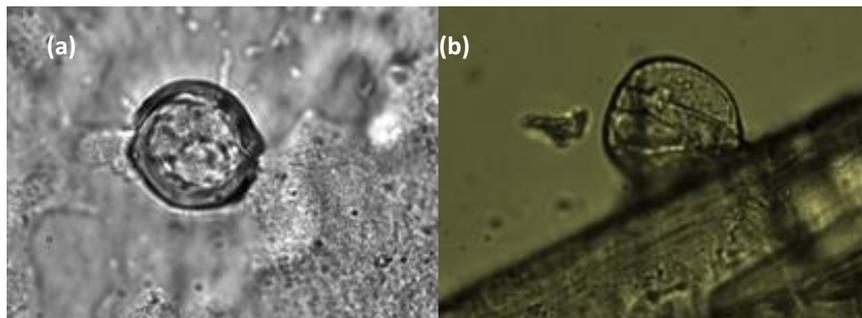


Figura 98. Immagini al microscopio (5x) ottenute da colture di *Neocallimastix*: a sinistra zoospora; a sinistra germinazione della zoospora su stelo di paglia

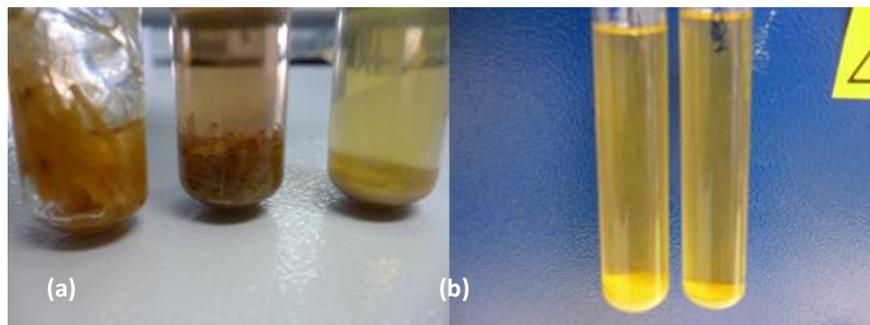


Figura 99. Immagini relative alla degradazione della paglia in tubi Hungate: nella foto a sinistra la paglia nel tempo iniziale, intermedio, e finale delle prove; nella foto a destra ciò che resta della paglia inizialmente fornita come substrato ai due ceppi fungini

Idrolisi e produzione di H₂ da rifiuti vegetali mediante autofermentazione in ambiente anaerobico

Fra i diversi tipi di microrganismi, i funghi sono quelli che, seppur lentamente, hanno maggiori capacità di attacco sulla lignina, mentre i batteri possiedono invece scarse capacità ossidative sulla lignina, ma ottime capacità idrolitiche su cellulosa ed emicellulosa - che sono in genere la componente più importante degli scarti e residui delle produzioni agricole - e la loro attività è estremamente importante, in quanto avviene in anaerobiosi stretta o facoltativa, che sono le condizioni in cui operano le comunità microbiche negli impianti a biogas.

Partendo da questa premessa, è proseguita la sperimentazione avviata lo scorso anno (PAR 2011) nella ricerca e studio delle comunità microbiche naturalmente presenti nei rifiuti vegetali con indagini volte a verificare la possibilità di produrre bioidrogeno per autofermentazione da scarti di insalata e scarti di insalata più bucce di patata.

Le precedenti sperimentazioni erano state condotte in condizioni mesofile di temperatura (28 e 37 °C). Gli esperimenti erano stati eseguiti senza pretrattamento e senza aggiunta di inoculo, ottenendo risultati molto promettenti. Era stata poi verificata l'efficacia cellulolitica del pool microbico selezionato dal processo di autofermentazione di scarti di insalata, utilizzando terreni sintetici in cui le uniche fonti di carbonio erano costituite da cellulosa e carbossi metil cellulosa.

La sperimentazione svolta durante la presente annualità è stata rivolta all'incremento delle rese di idrogeno (mL H₂/g Solidi Volatili) sperimentando:

- Il trattamento termico del substrato per favorire l'idrolisi e selezionare i microrganismi idrogeno produttori;
- la variazione della concentrazione del carico organico;
- L'uso come substrato di campioni di scarti di insalata ottenuti in periodi stagionali differenti.

Particolarmente interessante è stata la risposta alle prove tese a verificare l'efficacia o meno di un pretrattamento termico ai fini dell'incremento delle rese produttive in idrogeno. In questa serie di esperimenti sono stati utilizzati i substrati I e IP, trattati alla temperatura di 121 °C per 20 minuti e sono state confrontate le rese di produzione di idrogeno e i valori di pH con quelli ottenuti con i substrati non trattati (Tabella 27).

Tabella 27. Prove su scarti di insalata e insalata con patate trattate e non trattate termicamente

Substrato	Trattamento	Durata fermentazione (ore)	mL H ₂ /g SV	pH
Insalata	Si	168	91,85	5
	No	164	91,66	6,27
Insalata + bucce di patate	Si	168	46,96	4,7
	No	164	51,27	6

Dai dati riportati in tabella si può osservare che le rese non sono influenzate dal trattamento termico, a differenza del pH che, nei batch trattati, si abbassa a 4,7-5. Inoltre il trattamento non ha influenzato il tempo di fermentazione: in entrambe le condizioni le fermentazioni terminano intorno alle 100 ore di produzione. Le prove con insalata, comunque, forniscono rese doppie rispetto a quelle ottenute con la miscela di insalata e bucce di patate.

Di conseguenza, almeno per substrati e popolazioni microbiche del tipo di quelli usati nella presente sperimentazione, si può escludere la necessità di un pretrattamento termico, economicamente dispendioso, e questo incoraggia ulteriormente lo sviluppo di processi innovativi per la produzione di bioidrogeno da scarti vegetali.

Infine si è provveduto ad identificare - mediante estrazione, amplificazione e sequenziamento del DNA - i ceppi cellulolitici della comunità microbica precedentemente selezionata e utilizzata per le prove di autofermentazione. Sono state isolate dieci diverse colonie, di cui nove sono state identificate e riconosciute in quanto mostrano un'identità del 99-100% con ceppi conosciuti, mentre una ha prodotto sequenze non leggibili.

Sette colonie sono risultate appartenenti all'ordine dei *Lactobacillales*, di cui sei al genere *Enterococcus*, con sequenza simile al 100% alle sequenze delle specie *Enterococcus durans*, *E. faecium* e *E. faecalis*, ed una al genere *Lactobacillus* con identità del 100% simile con la specie *L. plantarum*. Tutti questi ceppi, messi in coltura separatamente, sono attualmente conservati presso i laboratori dell'ENEA.

a.5 Studio e valutazioni comparative di sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di digestione anaerobica

Nell'ambito di questa linea di attività sono stati effettuati studi e attività sperimentali riguardanti la coltivazione di microalghe, avente come fine il riciclo di digestato liquido proveniente da un impianto a biogas, nonché la produzione di biomassa algale in sospensione impiegabile anch'essa per la produzione di biogas.

L'impianto di biogas da cui è originato il digestato impiegato è situato all'interno di una fattoria dedicata alla produzione di latte di mucca, nel territorio di Nepi (VT). La sperimentazione è avvenuta, tramite l'utilizzo di contenitori e tecniche colturali di vario tipo, in ENEA [rapporto RdS/2013/177].

Gli obiettivi del lavoro sono così riassumibili:

- studi per definire lo stato dell'arte delle ricerche sulla produzione di biogas tramite microalghe;
- prove sperimentali di utilizzo di digestato liquido, proveniente da processi di digestione anaerobica per la produzione di biogas, come fertilizzante per la crescita di microalghe;
- sperimentazione di laboratorio della digestione anaerobica di biomassa microalgale per una valutazione preliminare del potenziale di produzione di biogas.

Stato dell'arte della produzione di biogas da colture di microalghe

Nell'ambito della sperimentazione in oggetto sono stati condotti una serie di studi su pubblicazioni attinenti le tematiche di interesse e si è così giunti a evidenziare alcune considerazioni teoriche che hanno fornito i presupposti su cui basare la successiva sequenza di prove sperimentali. Naturalmente, oltre agli studi, hanno contribuito alla realizzazione di queste ultime le esperienze maturate nel corso degli anni presso i laboratori ENEA in cui è proseguita la pratica delle coltivazioni microalgali.

Le microalghe, note anche come fitoplancton, sono organismi microscopici unicellulari acquatici. Le loro dimensioni possono variare da alcuni micrometri ad alcune centinaia di micrometri. Si possono presentare sia singolarmente sia aggregate in varie forme.

Fra le caratteristiche d'interesse delle microalghe, la più importante è l'elevatissima efficienza di produzione, dovuta al fatto che ogni singola cellula microalgale è fotosinteticamente attiva, contrariamente a quanto accade per le piante vascolari, nelle quali solo una parte delle cellule è adibita alla fotosintesi. Inoltre, le alghe sono direttamente a contatto con i nutrienti presenti nel mezzo acquoso in cui crescono, mentre nelle piante vascolari questi debbono essere trasportati attraverso steli e radici con conseguente impiego di tempo ed energia. Si stima che la produttività delle alghe per anno e per ettaro sia dalle 5 alle 30 volte superiore a quella delle piante terrestri.

Queste interessanti prerogative purtroppo si accompagnano a diverse problematiche che hanno a tutt'oggi impedito uno sfruttamento adeguato del loro potenziale, nonostante diversi decenni di ricerca e sviluppo e la relativa pubblicazione di migliaia di lavori scientifici.

Esistono, infatti, ancora diversi punti critici da affrontare prima di poter realizzare produzioni energetiche economiche che vadano oltre stime più o meno ottimistiche ottenute da esperienze realizzate su scala limitata o, peggio, solo da calcoli teorici basati su estrapolazioni di risultati di laboratorio. Su questi aspetti di ampliamento della scala operativa si attendono ancora risultati consolidati da parte del mondo della ricerca, anche in termini di definizione dei prodotti energetici maggiormente convenienti.

Le microalghe risultano particolarmente adatte per essere sottoposte a digestione anaerobica a causa dell'assenza di lignina, che è un composto organico difficile da digerire, presente in misura maggiore o minore in quasi tutte le matrici vegetali di origine terrestre.

Nel presente lavoro le microalghe sono state in parte fertilizzate ricorrendo al digestato liquido, ovvero un sottoprodotto della digestione anaerobica, che contiene elementi fertilizzanti maggiori e minori, oltre ad un particolato organico di dimensioni microscopiche. In questo modo si tende ad effettuare un riciclo di nutrienti che consente da un lato la riduzione dello spargimento del digestato su suoli agricoli, mezzo di utilizzazione attualmente più diffuso, dall'altro di creare nuova biomassa per alimentare il digestore e produrre nuovo biogas.

Vi sono tuttavia, come già accennato, aspetti che risultano ancora problematici nell'ambito di una coltivazione di microalghe su scala commerciale. In particolare, la difficoltà di penetrazione nel mercato energetico è determinata sia dalla spesa energetica necessaria in ogni singola fase del processo produttivo: coltivazione, raccolta, pretrattamento (separazione dal mezzo di coltura e concentrazione), sia dal costo delle infrastrutture dedicate relative al processo di produzione di energia. Un ulteriore problema si riscontra nella difficoltà di ottenere una coltura monospecifica che non sia contaminata da specie estranee concorrenti, oppure consumata da organismi animali che se ne alimentano. Quest'ultimo problema appare largamente sottovalutato, soprattutto per realizzazioni in climi temperati all'aperto.

A questo proposito, un aspetto favorevole dell'impiego delle microalghe per la produzione di biogas riguarda il fatto che il processo produttivo può essere realizzato anche con una biomassa non particolarmente pura. In questo caso potranno variare, non necessariamente in peggio, le rese in metano, ma la produzione non risulterebbe irrimediabilmente persa. Ne consegue che la coltivazione della biomassa microalgale ai fini della digestione anaerobica può essere effettuata con successo anche in vasche all'aperto, da cui deriverebbe un possibile importante risparmio nei costi di produzione.

Dall'esame della letteratura più recente, emerge che può verificarsi qualche difficoltà nella degradazione fermentativa dell'intera biomassa microalgale, soprattutto per alcune specie, quali *Scenedesmus obliquus* e *Chlorella vulgaris*, anche se nel caso specifico tali l'HRT (Hydraulic Retention Time), ovvero il tempo di ritenzione idraulica all'interno del digestore, pare sottostimato rispetto a quanto verificato nella gestione reale di impianti produttivi. Occorre comunque considerare sia condizioni di sviluppo produttivo, sia eventuali pretrattamenti a monte della digestione anaerobica, atti ad ottimizzare le rese in biogas, nel caso ci sia evidenza di tassi di degradazione troppo contenuti.

Attività sperimentali

I concetti alla base delle prove sperimentali realizzate nell'ambito del presente lavoro sono:

- la localizzazione prevalentemente in campo, ovvero all'aperto, delle colture microalgali. Con il corollario della vicinanza alle supposte condizioni produttive reali, piuttosto che a quelle "artificiali" di laboratorio, improponibili per impianti commerciali;
- l'utilizzo di volumi di coltura significativi, a partire dalle decine di litri (sacchi di polietilene) per arrivare ai metri cubi (piscina fuori terra);
- l'utilizzo di tecnologie produttive "low cost" e di riutilizzo e riciclo di materiali e sottoprodotti di cicli produttivi associati. Es. bottiglie di PET, sacchi di polietilene, piscine fuori terra in plastica, azoto, fosforo e nutrienti minori derivati dal digestato liquido di impianti a biogas.

Lo *Scenedesmus dimorphus*, UTEX 1237, specie microalgale utilizzata per le prove sperimentali, è un cosmopolita di acqua dolce, dalla forma a fuso, spesso unita in quartetti attaccati per la parte centrale del fuso stesso. Ha caratteristiche di buona produttività, robustezza e facilità di coltura, risentendo relativamente poco delle contaminazioni di altre specie microalgali e sopravvivendo a range di temperatura piuttosto estesi. Lo *Scenedesmus* è stato scelto proprio per le succitate caratteristiche, individuate e verificate nel corso di alcuni anni di esperienza di coltivazione presso i laboratori del C.R. ENEA Casaccia, caratteristiche per le quali si è dimostrato superiore a tutti gli altri ceppi di acqua dolce testati. Per contro, specie dello stesso genere, quali il già citato *Scenedesmus obliquus*, hanno evidenziato problemi nella degradazione fermentativa anaerobica rispetto ad altre specie microalgali dalle pareti meno robuste.

Le colture microalgali sono state realizzate in contenitori di crescente volume, in accordo con la procedura comunemente adottata, fino ad arrivare a volumi adatti per il trasferimento ed il successivo avvio di colture all'aperto di volumi maggiori.

Le coltivazioni all'aperto sono state realizzate principalmente in sacchi trasparenti di polietilene a bassa densità. Tali sacchi possono avere diametri e lunghezze diversi, (i sacchi della serie 5 e 8 avevano diametro di 12,7 cm, tutti gli altri di 22 cm; Figura 100).

L'areazione/agitazione è assicurata da tubicini/cannucce che portano l'aria nella zona inferiore del sacco, da cui questa si propaga velocemente sotto forma di bolle fino alla superficie del mezzo di coltura, agitando e omogeneizzando la stessa, oltre a provvedere agli scambi gassosi. Tale agitazione consente inoltre un'esposizione relativamente omogenea alla luce solare delle singole cellule fotosintetiche della coltura. L'aria immessa, proveniente da un aeratore posto al riparo della luce solare diretta, consente di evitare aumenti localizzati di temperatura che altrimenti avverrebbero in condizioni di stagnazione. I flussi d'aria utilizzati per ciascun sacco erano di 0,17-0,2L /s. Sulla cima del sacco, nella zona sopra la lama d'acqua, viene effettuato un piccolo taglio richiudibile mediante nastro adesivo, per garantire l'immissione e l'emissione di aria, oltre alla possibilità di effettuare misurazioni e di prelevare campioni.

I mezzi di coltura erano costituiti da:

- acqua dolce da condotta di centro, sterilizzata chimicamente mediante l'impiego di ipoclorito di sodio allo 0,4%, tamponato dopo qualche ora con lo stesso quantitativo di una soluzione madre di tiosolfato di sodio disciolto a 125 g/L in acqua distillata;
- concime liquido commerciale per piante ornamentali con un rapporto 7:5:6 di NPK e con nutrienti minori ed EDTA per chelare i metalli, utilizzato normalmente, quando unica fertilizzazione, all'1% in volume;
- digestato liquido in concentrazioni variabili tra il 2 e il 15%, conservato a temperatura ambiente in recipienti non ermeticamente chiusi per via dell'ulteriore produzione di gas che mette in pressione il recipiente stesso. In alcuni casi la fertilizzazione era a base di solo digestato, in altri si integrava con lo 0,5% di concime liquido commerciale.

Gli inoculi utilizzati consistevano in colture mature di *S. dimorphus*, a concentrazioni intorno a 1 g/L di s.s.. Si sono utilizzati rapporti di circa 1/10 tra inoculo e mezzo di coltura nuovo.

Un'ulteriore prova è stata realizzata utilizzando una piscina fuori terra di dimensioni 3 x 2 x 0,66 m. Tale contenitore è stato attrezzato con pannello divisore interno in carbonato che consentiva il realizzarsi di un movimento a circuito della coltura e di sostenere un telo di plastica trasparente di copertura. Per attivare la movimentazione della coltura si è fatto uso di un air lift a pannello obliquo autocostruito in perspex trasparente, alimentato da un aeratore da 30 W.



Figura 100. Sacchi di coltura

La lama d'acqua di partenza era di 27 cm, pari ad un volume di coltura di 1,620 L. L'inoculo è stato effettuato mediante 3 sacchi da 30 L, per un totale di circa 90 L di coltura matura di *Scenedesmus dimorphus*. La fertilizzazione è consistita in concime liquido commerciale allo 0,5⁰/₀₀ e in 5,5 L di digestato liquido, pari al 3,4⁰/₀₀ del volume di coltura.

Da rilevare che nelle sperimentazioni descritte non si è fatto uso di CO₂ aggiunta, ovvero la CO₂ disponibile alle colture era quella atmosferica immessa dal sistema di aereazione, pari allo 0,03% in volume di aria.

I parametri misurati sono stati: temperatura giornaliera dell'aria minima, massima e media, radiazione solare in forma di flusso fotonico fotosinteticamente attivo giornaliero medio (PPF), temperatura del mezzo di coltura con medie giornaliere basate su rilevazioni ogni 15 minuti mediante sonda e data logger Tinytag, pH, ossigeno disciolto, conducibilità, solidi totali disciolti. I dati meteorologici provenivano dalla centralina ENEA posta presso il C.R. Casaccia, distante circa 100 m dal sito delle colture microalgali.

Le rese sono state determinate mediante l'ottenimento del dato di sostanza secca totale, effettuato addizionando la resa del decantato e quella delle acque di risulta dopo decantazione. Il volume di riferimento è stato quello finale, in genere leggermente più basso di quello iniziale per via dell'evaporazione.

I dati riportati nelle Figure 101 e 102 mostrano rese diverse in rapporto a periodi temporali diversi, oltre che a mezzi di coltura e, in un caso, a diametri del sacco diversi, ma, standardizzando per rese giornaliere, le differenze risultano meno accentuate. Tali rese, peraltro, sono in linea con quanto ottenuto nelle prove di laboratorio svolte da Li Xin e collaboratori⁵ con *Scenedesmus sp.* per definire rapporti ottimali tra azoto e fosforo in funzione delle rese produttive.

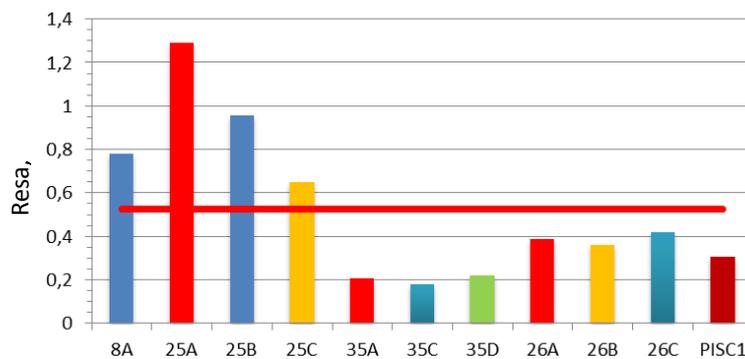


Figura 101. Resa produttiva dei diversi contenitori in g/L (la linea rossa indica il valore medio)

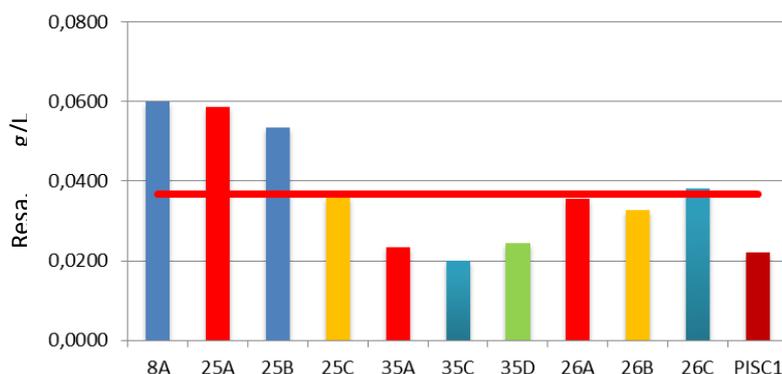


Figura 102. Resa produttiva giornaliera dei contenitori in g/L (la linea rossa indica il valore medio)

L'elevata resa giornaliera evidenziata per il sacco 8A può essere spiegata sia per il ridotto diametro del sacco, che favorisce una migliore penetrazione del flusso fotonico all'interno della coltura, sia per la maggiore media di flusso fotonico fotosintetico (fattore PPF) beneficiata durante il periodo della sperimentazione. Per contro, le temperature mediamente più alte registrate nei mesi di luglio e agosto non sembrerebbero favorire la produttività delle colture.

Il limite superiore di tolleranza alle temperature delle colture nelle condizioni sperimentate, oltre il quale le colture di *Scenedesmus dimorphus* testate muoiono, è risultato attorno ai 42 °C.

⁵ Li Xin, Hu Hong-ying, Gan Ke, Sun Ying-xue, *Bioresource Technology* 101 (2010) 5494–5500

Riguardo alle fertilizzazioni, sembra che le integrazioni del digestato con lo 0,5⁰/₁₀₀ di concime liquido commerciale abbiano determinato rese migliori rispetto al digestato tal quale, anche per concentrazioni elevate, come 10 e 150⁰/₁₀₀. In effetti, a tali concentrazioni, il mezzo di coltura acquista colorazioni molto scure, che incidono evidentemente in maniera negativa sulla trasmissione della luce attraverso la coltura, per cui occorre trovare il miglior equilibrio tra disponibilità di nutrienti, alti tassi di depurazione e propagazione della luce.

Occorre comunque sottolineare che la specie testata non ha mai, nemmeno alle concentrazioni più elevate, apparentemente risentito di effetti tossici da parte del digestato liquido. Come già accennato, la ridotta produttività sembrerebbe maggiormente ascrivibile alla ridotta propagazione della luce.

La piscina (Pisc1) è stata inoculata e raccolta, dopo 14 giorni di coltura. Il volume interno è aumentato in relazione ad immissioni di acqua piovana durante concomitanti condizioni ventose che hanno parzialmente e temporaneamente spostato la copertura. Il volume finale è stato di 2070 litri, con un incremento del 22% rispetto ai valori iniziali, dal quale sono stati raccolti 85 L di decantato e 1985 L di acqua di risulta. Ovviamente le rese hanno risentito negativamente di questa circostanza, pur mantenendosi su valori accettabili, comparabili con i valori più contenuti ottenuti con i sacchi.

La decantazione, effettuata dal 4 al 6 settembre, ha portato ad un'ottima separazione della biomassa dall'acqua di risulta, probabilmente anche in relazione ad una certa sedimentazione già avvenuta nel corso della coltura grazie all'agitazione continua di bassa intensità (Figura 103).

Da rilevare che la biomassa ottenuta con la decantazione, conservata a temperatura ambiente per circa 10 giorni in contenitori di plastica con tappo appoggiato, ha dato luogo a fermentazione anaerobica nella parte inferiore dei contenitori, con sviluppo del classico odore del digestato. Un campione di tale biomassa è stato utilizzato per analisi sulla produzione di biogas.

Esami microscopici della biomassa hanno mostrato la presenza preponderante di *Scenedesmus*, con elementi mobili vari (protozoi) e molta massa decomposta attaccata da abbondanti batteri. Macroscopicamente, erano presenti, oltre a residui di insetti vari, anche vermi di colore rosso, per ora non identificati.



Figura 103. Decantato della piscina

La biomassa microalgale proveniente da diverse prove è stata sottoposta ad analisi chimiche presso i laboratori del Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma Sapienza [rapporto RdS/2013/281] per determinarne la biomassa totale e la composizione (proteine, lipidi, carboidrati e componente inorganica), mentre le acque di vegetazione sono state analizzate per determinare la quantità di nutrienti residui presenti (azoto, fosforo e potassio) ed effettuare una comparazione con la composizione in N, P, K del digestato utilizzato come nutriente.

Dai dati sperimentali si rileva un forte consumo di azoto da parte delle alghe in presenza di digestato che, nell'ipotesi di una coltura permanente, suggerirebbe di aggiungere periodicamente un'aliquota di digestato per reintegrare il contenuto di azoto. Infatti, i campioni ai quali è stato aggiunto del fertilizzante, contemporaneamente al digestato, mostrano un'evidente crescita più abbondante, come si rileva dalla maggiore quantità di biomassa recuperata.

Tuttavia, un fattore importante è rappresentato dalla colorazione del digestato che oltre una certa concentrazione contribuisce ad "opacizzare" il medium di coltura impedendo una penetrazione ottimale della luce e quindi una corretta illuminazione per il normale sviluppo delle microalghe. A tale proposito sarebbe auspicabile vedere come influisce l'opacità del mezzo di coltura andando a valutare l'intensità luminosa all'interno della soluzione di crescita a diverse concentrazioni di digestato aggiunto.

Per quanto riguarda la composizione del digestato, non è da escludere una variabilità piuttosto ampia per quanto riguarda la composizione in macroelementi (N, P, K) in funzione della natura del materiale sottoposto a digestione anaerobica, e sono quindi necessari ulteriori studi per determinare come questo possa influire sulla crescita algale. Per questo sarebbe necessario analizzare un numero maggiore di campioni di digestato, di diversa provenienza, in modo da avere un'idea della composizione media di tale prodotto.

Considerazioni finali

La prova con i sacchi in polietilene ha condotto alla realizzazione di un sistema semplice e affidabile di sospensione dei sacchi e di allestimento degli stessi per la coltura microalgale all'aperto, mediante fori richiudibili per l'immissione di aria e per campionamenti, nonché mediante l'utilizzo di tubicini rigidi in plastica per far arrivare

l'aria sul fondo dei sacchi. La forma e lo spessore (180 µm) del polietilene dei sacchi sono risultati in generale soddisfacenti, così come la tenuta delle saldature di fabbrica. L'effetto importante della penetrazione della luce solare all'interno della coltura è stato confermato dai buoni risultati del sacco con diametro minore, d'altro canto penalizzante in termini volumetrici. I tre sacchi con le rese minori sono stati anche quelli con la durata minore e questo può spiegare in buona parte la loro prestazione non brillante.

La prova effettuata con la piscina fuori terra indica una sostanziale riuscita del contenitore proposto, anche in termini di economicità dello stesso, con lo sviluppo di un quantitativo soddisfacente di biomassa microalgale, pur con alcuni danni alla copertura, registrati in occasione di una forte perturbazione con pioggia e vento, che hanno comportato una diluizione della coltura.

Il sistema di movimentazione dell'acqua, progettato "in house", si è rivelato efficace e robusto, senza aver mai dato problemi. Da migliorare invece il sistema di copertura, sia per la qualità del telo plastico, risultato a volte strappato, sia per la tipologia degli ancoraggi.

L'utilizzo del digestato impiegato in queste prove ha confermato la piena compatibilità dello stesso con la specie microalgale testata, non causando nessun problema tossicologico apparente. Le microalghe sono, infatti, cresciute anche con il solo digestato liquido, testato fino al 15⁰/₁₀₀. In questi casi, però, il mezzo di coltura ha inizialmente un colore molto scuro che verosimilmente ritarda lo sviluppo microalgale per scarsa disponibilità di luce.

La biomassa ottenuta dalla piscina è in grado, già dopo pochi giorni di deposito in contenitori chiusi a temperatura ambiente, di produrre spontaneamente biogas.

In sostanza, le prove effettuate hanno rappresentato un tentativo di avvicinamento alle modalità produttive "low cost", in termini di condizioni climatiche, riciclaggio e riuso di materiali ed elementi nutrienti, che si riscontrerebbero con maggiore probabilità in aziende interessate a mettere in pratica la tecnologia oggetto della sperimentazione.

a.6 Prove sperimentali di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di biomasse ad elevato contenuto di umidità

Una notevole quantità di rifiuti organici e una componente significativa dei sottoprodotti di origine vegetale presentano un elevato contenuto di acqua (tipicamente superiore al 95%) ed è necessario prevedere fasi di riduzione dell'umidità, economicamente ed energeticamente penalizzanti, prima che tali materiali possano essere convertiti in energia e/o biocombustibili. In questi casi l'adozione di processi idrotermici, come la gassificazione con acqua in condizioni supercritiche (SCWG) rappresenta una promettente alternativa, in quanto le biomasse umide possono essere gassificate senza essiccamento o trattamenti preventivi.

I processi idrotermici sono definiti come trasformazioni chimico-fisiche ottenibili ad elevate temperature (200-600 °C) e pressioni (50-400 bar) in condizioni superiori o vicine a quelle critiche dell'acqua. In condizioni di acqua supercritica (T > 374 °C, P > 220 bar) le biomasse reagiscono con l'acqua per formare un syngas ricco in idrogeno e metano, dove l'idrogeno ottenuto deriva sia dalla matrice sia dall'acqua stessa ed inoltre le reazioni sono rapide e portano alla gassificazione completa in tempi brevi. L'uso di catalizzatori può ridurre la temperatura di processo, anche se in alcune condizioni può non garantire elevate prestazioni in termini di conversione.

In un processo industriale di SCWG sia l'efficienza energetica, sia le caratteristiche dei prodotti possono essere migliorati in modo significativo. Come detto in precedenza, la gassificazione è effettuata direttamente alimentando la biomassa tal quale e solo una piccola parte dell'acqua partecipa alle reazioni mentre quella in eccesso (che agisce da solvente per le condizioni supercritiche) viene riscaldata nel processo.

Dal momento che rendimenti di gassificazione migliori sono ottenuti a concentrazioni più elevate di acqua, il recupero di energia dalle correnti in uscita dalle apparecchiature è una componente essenziale per garantire la sostenibilità del processo. A titolo di esempio si consideri che, in assenza di apporti energetici, in un processo operante a 700 °C e 25 MPa, il computo dell'energia netta ottenibile diventa positivo quando l'alimentazione contiene più del 25% in peso di sostanza secca organica. Se, tuttavia, si prevedono scambi termici, correnti con concentrazione di acqua superiori diventano sostenibili da un punto di vista processistico.

La caratteristica peculiare del processo è l'alta pressione a cui le reazioni vengono condotte, tuttavia questo non rappresenta un problema significativo per la costruzione di reattori tubolari continui, se si prevedono soluzioni con un diametro relativamente contenuto. Processi ad alta pressione sono, infatti, molto comuni anche nell'industria di trasformazione chimica, per esempio, nella produzione di ammoniaca e l'alta pressione è una condizione di vantaggio per la resa in gas prodotto. Dal momento che la gassificazione avviene in pressione, il gas prodotto è già pressurizzato in uscita dal sistema e questo può essere un vantaggio per l'utilizzo in turbine, ma anche per alimentare processi successivi (la produzione etanolo ad esempio) che richiedono pressioni operative maggiori di

quella atmosferica. Inoltre, la CO₂ prodotta dal processo può essere separata agevolmente attraverso colonne di lavaggio.

Poiché si opera con substrati in fase liquida, i consumi energetici per il lavoro necessario alla compressione, che rappresenta l'operazione preliminare alla gassificazione, è molto basso rispetto al recupero energetico realizzabile attraverso stadi espansione successivi del gas prodotto ad alta pressione, e questo è molto importante, specie quando le finalità del syngas sono volte alla produzione di biofuel liquidi o gassosi la cui produzione passa attraverso l'ausilio di catalizzatori in fase eterogenea e comporta pertanto elevati costi per tale stadio.

Nella presente annualità si è provveduto alla realizzazione di un impianto sperimentale di piccola taglia operante in condizioni supercritiche, nonché a continuare l'attività iniziata nella precedente annualità con un dispositivo sperimentale in grado di operare in condizioni prossime a quelle critiche [rapporto RdS/2013/232].

L'impianto è un reattore plug flow in grado di processare matrici organiche con elevati contenuti in acqua in condizioni supercritiche (T = 375 °C; P = 220 atm). Il reattore tubolare è stato dimensionato per operare fino a pressioni di 350 atm e temperature di 550 °C. L'impianto è dotato di un sistema di preriscaldamento in grado di portare il fluido processo, precedentemente pressurizzato fino alla temperatura di 300-350 °C. In seguito, nel reattore, si può arrivare fino alla temperatura di esercizio fino a 550 °C, attraverso due differenti resistenze scaldanti in grado di garantire un più ampio range di funzionamento sia in condizioni sub che supercritiche.

Lo sludge o altre matrici liquide, in condizioni normali, hanno la possibilità di essere alimentate da un sistema di pompaggio a monte del reattore ed in grado di regolare la pressione di lavoro dell'impianto nel intervallo 100-350 atm. All'interno della sezione di reazione, il profilo termico è garantito dalla presenza di una muffola scaldante del tipo a conchiglia con possibilità di apertura su tutta la lunghezza, in materiale ceramico e isolato verso l'esterno del reattore. La regolazione della temperatura all'interno della muffola è garantita da tre sistemi di potenza immersi nella chiocciola scaldante all'interno della quale è avvolto il reattore tubolare in modo da riuscire a garantire profili di temperatura all'interno del reattore stesso a seconda della condizione di processo che si vuole ottenere.

All'uscita del reattore è presente un condensatore tubolare rivestito da una camicia all'interno della quale viene alimentata acqua di raffreddamento. La separazione tra l'acqua di processo, vapori condensabili e la fase gassosa avviene mediante un serbatoio di raccolta di volume pari a 500 mL. Il gas così ottenuto sarà poi inviato alla linea del vent sulla quale avverrà la regolazione della pressione di esercizio.

A seconda delle condizioni di processo, l'impianto prevede la possibilità di alimentare, insieme allo sludge, soluzioni acquose che possono fungere da catalizzatori in fase omogenea per il processo, oppure a valle, utilizzate per l'upgrading attraverso la rimozione dell'anidride carbonica.

La pressurizzazione dell'intero sistema di reazione è garantita a valle del separatore, sulla linea gas attraverso il sistema di controllo in grado di pressurizzare il sistema di reazione e regolare l'andamento della prevalenza fornita dal sistema di pompaggio ai valori di set-point richiesti.

Il reattore tubolare è dotato di un volume utile regolabile nel range 0-0,3 L attraverso l'interposizione di appositi distanziali, mentre la portata del liquido di processo è regolabile in un ampio range di funzionamento in modo da garantire tempi di residenza da pochi minuti fino ad 1 ora.

Il corpo del reattore è realizzato con teste flangiate rimovibili provviste di adeguate guarnizioni di tenuta che consentono l'accesso al corpo del reattore per il recupero dei materiali e la pulizia dello stesso. Su entrambe le teste sono montati supporti rimovibili per il contenimento di catalizzatori granulari. Sulla linea al vent, a valle del sistema di depressurizzazione, è presente il collegamento al gascromatografo on line e valvola manuale on/off. Sulla linea di alimentazione al sistema di analisi è installato un separatore di condensa, completo di filtro, per la rimozione di eventuali trascinamenti.

L'impianto sperimentale è dotato di un sistema di controllo interfacciato attraverso il software in modo da poter controllare da remoto i parametri di processo, temperatura, pressione e portata e provvedere alla loro registrazione real time. Il P&I dell'impianto di gassificazione in condizioni supercritiche è riportato in Figura 104.

In attesa della realizzazione dell'impianto, e allo scopo di acquisire maggiori conoscenze sul comportamento delle diverse biomasse e sui prodotti che si ottengono dalla loro degradazione conseguente a processi di gassificazione in ambiente acquoso, sono state condotte ulteriori prove di gassificazione con acqua in condizioni subcritiche, utilizzando allo scopo un impianto pilota di piccola taglia già impiegato nel corso della precedente annualità, consistente in una autoclave in grado di portare le matrici alimentate a pressioni superiori a quelle critiche e temperature fino a 340°C.

Le prove sono state condotte a pressioni comprese fra 110 e i 300 bar e temperature di 300-320 °C utilizzando come substrato digestato da liquame di bufala. Con simili condizioni operative i trattamenti idrotermici di matrici organiche cellulose portano alla formazione di soluzioni liquide che contengono composti organici per oltre il 70%p rispetto all'alimentato, e pertanto possono avere una valenza non solo per il pretrattamento del solido da avviare alla successiva produzione di syngas, ma e soprattutto per ottenere soluzioni acquose che contengono costituenti fondamentali, intermedi o materie prime di interesse dell'industria chimica, come furfurali, acido formico, benzotriolo, acido lattico e acido acetico.

Molte sono ancora le criticità per uno sviluppo e una dimostrazione dei processi oggetto dello studio su una scala più ampia, anche se le prospettive di sviluppo tecnologico rendono molto attraente il processo sia come pretrattamento finalizzato alla produzione di solido più facilmente gassificabile con le tecnologie attualmente disponibili, sia, soprattutto, nella prospettiva di una valorizzazione economica del residuo liquido contenente intermedi organici ad elevato valore per l'industria chimica.

Per questi ultimi, in particolare, l'attività di ricerca ha evidenziato la possibilità di poter passare, nel caso dei fanghi di digestione anaerobica, attraverso intermedi nei quali si produce in concentrazione predominante acido acetico, utilizzato come precursore di sintesi in differenti processi, come la produzione del polietilentereftalato (PET), acetato di cellulosa (pellicole), acetato di polivinile (colle), fibre sintetiche e tessuti (rayon), nonché produzione di solventi per vernici e farmaci.

Valutazioni energetiche di processi di trattamento idrotermali ad alta pressione di differenti biomasse

Presso l'Università della Calabria sono state effettuate attività di ricerca e sperimentazione finalizzate allo sviluppo di un modello termodinamico di equilibrio per lo studio delle reazioni di gassificazione di biomasse con acqua in condizioni supercritiche o vicine a tale condizione, messo a punto nel corso della precedente annualità dell'AdP [rapporto RdS/2013/231].

In particolare, le attività sono state dedicate a due temi principali: l'introduzione del bilancio di energia all'interno della modellazione del processo di SCGW ed il confronto tra le prestazioni (in termini di composizione del gas risultante e di impatto energetico del processo) di differenti tipologie di biomasse di interesse per una possibile valorizzazione energetica: gusci di mandorle, digestato da depurazione di acque reflue e alghe.

Da un punto di vista generale, la modellazione del bilancio di energia deve tenere in conto di alcuni elementi particolari, conseguenti sia alle caratteristiche delle biomasse, che sono spesso note in termini di composizione minima e per le quali pochi dati termodinamici sono disponibili, sia alle alte pressioni in gioco che rendono non ideali i comportamenti delle miscele.

La base di partenza è costituita dal modello di equilibrio termodinamico, sviluppato nel corso della precedente annualità della RdS, per la parte relativa al bilancio di materia. In particolare il raggiungimento della condizione di equilibrio chimico passa per la minimizzazione dell'energia libera di Gibbs del sistema (G), calcolata come somma del potenziale chimico di ciascun componente presente all'equilibrio (μ_i) moltiplicato per il numero di moli dello stesso componente (n_i). La soluzione del relativo set di equazioni consente di definire con precisione il bilancio di materia, identificando sia le specie presenti all'equilibrio, assunto come condizione finale del processo, sia le relative quantità.

Nella stima del carico energetico in gioco nel processo è possibile solo il calcolo della variazione di entalpia tra la condizione finale e quella iniziale del processo. Questa situazione ingloba in un'unica "black box" tutto l'insieme di operazioni unitarie (riscaldamento, compressione, reazioni chimiche) e, sebbene non sia adatta per una analisi puntuale del sistema, può essere di grande interesse per un primo confronto tra diverse condizioni operative e biomasse trattate.

In questo caso la variazione di entalpia assume al forma:

$$\Delta H = H_{fn} \left(m_{fn}^{tot}, x_{fn}^i, T_{fn}, P_{fn} \right) - H_{ini} \left(m_{ini}^{tot}, x_{ini}^j, T_{ini}, P_{ini} \right) = 0$$

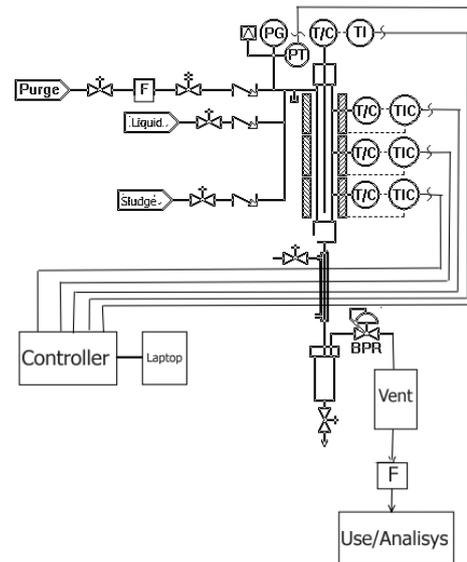


Figura 104. P&I dell'impianto sperimentale per la gassificazione con acqua in condizioni supercritiche

dove la differenza tra le composizioni iniziali e finali è segnalata attraverso i differenti apici delle relative frazioni molari e dalla differenza del numero di moli totali m^{tot} . Tuttavia per il calcolo dei due contributi sarebbe necessario conoscere le entalpie di formazione di ogni componente, cosa non possibile quando tra i reagenti compaiono componenti di difficile caratterizzazione, come le biomasse, per via delle loro composizione variabile.

Per questo motivo è necessario utilizzare un altro metodo per la quantificazione della variazione di entalpia tra lo stato iniziale e finale. In particolare, ricordando che l'entalpia è una funzione di stato, la cui variazione dipende solo dallo stato iniziale e finale, è possibile riconsiderare le condizioni iniziali e finali come i due punti termodinamici tra i quali è compresa la trasformazione ed utilizzare un qualsiasi percorso che li unisca e del quale siamo in grado di valutare i contributi. Il procedimento è esemplificato nella Figura 105 dove il percorso termodinamico tra i reagenti nelle condizioni iniziali ed i prodotti nelle condizioni finali, è articolato in due tratti la cui somma equivale alla variazione di energia da calcolare:

$$\Delta H = \Delta H_R^0 + \Delta H_{\text{Mix}}$$

dove il primo contributo è relativo alla variazione di entalpia associata alla reazione chimica a T_{ini} , mentre il secondo termine (a composizione costante) porta in conto l'effetto sull'entalpia della temperatura di reazione e della pressione operativa (T_{fin} e P_{fin}).

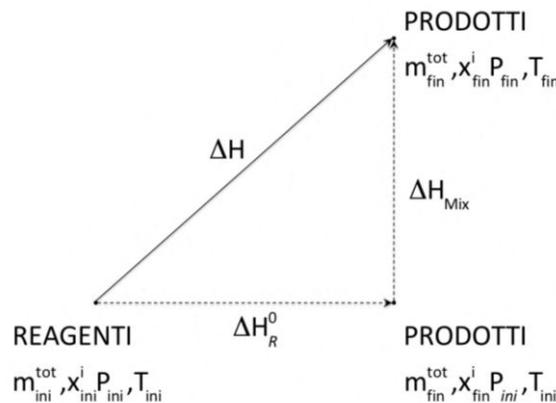


Figura 105. Percorso termodinamico per la determinazione della variazione di entalpia in un processo di SCWG

Nel caso specifico si assume che tutti i reagenti siano alimentati alla temperatura di 298 K e alla pressione iniziale $P_{\text{ini}} = 1 \text{ atm}$. Tale assunzione, pur non facendo perdere di generalità alla trattazione, consente di trattare il primo step ipotizzando le condizioni di stato standard⁶ per cui la variazione di entalpia associata alla trasformazione di reagenti in prodotti può essere calcolata come differenza tra il potere calorifico inferiore LHV dei reagenti e quello dei prodotti.

Si noti come questo rappresenta l'unico dato facilmente reperibile per quanto riguarda le biomasse, in quanto stimabile con semplici esperimenti calorimetrici. In tal modo, ipotizzando che non siano presenti residui di biomassa nelle condizioni finali (ipotesi ampiamente accettabile per via dell'alta efficienza del processo in condizioni supercritiche), è possibile portare in conto le trasformazioni che prevedono l'utilizzo di substrati reali.

Al fine di migliorare l'accuratezza della trattazione e nell'ottica di supportare un futuro lavoro di stima delle integrazioni energetiche, è stata anche condotta l'analisi dello stadio di compressione che rappresenta l'operazione preliminare alla vera parte reattoristica. Risulta infatti utile stimare questo costo (energetico) qualora si intendesse condurre un recupero energetico attraverso stadi di espansione successivi del gas prodotto ad alta pressione.

La variazione di entalpia associata alla compressione di una fase liquida può essere stimata come:

$$\Delta H_{\text{comp}} = w \int \frac{1}{\rho(P, T)} dP$$

dove w è la massa di acqua trattata e ρ la densità della fase, in funzione della pressione e della temperatura. Ipotizzando che, ad ogni pressione la densità della fase liquida non sia troppo diversa da quella calcolata in condizioni di saturazione (ossia assumendo una debole dipendenza della densità del liquido dalla temperatura). Al

⁶ S, I, Sandler, Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics 4 Edition, (2006), John Wiley and Sons, Hoboken (NJ)

di sopra della condizione critica è stata utilizzata l'equazione del coefficiente di compressibilità assumendo, viste le ridotte concentrazioni di biomassa, di trattarlo come un fluido puro.

Applicazione del modello alle biomasse di potenziale interesse

Il modello è stato risolto utilizzando il software MATLAB® avvalendosi della subroutine FMINCON per eseguire la minimizzazione dell'energia libera di Gibbs. Il successivo bilancio di energia è stato calcolato, sulla base dei risultati ottenuti per il bilancio di materia, attraverso una subroutine dedicata.

Il modello è stato applicato a due substrati di interesse per il lavoro sviluppato nell'ambito della presente annualità: il digestato da depurazione di acque reflue e le alghe, messi a confronto con un classico materiale lignocellulosico "secco" come i gusci di mandorle. Le principali caratteristiche chimico-fisiche di queste biomasse sono riportate in Tabella 28.

Trascurando il contenuto di cloro e zolfo, ognuna delle biomasse in esame è stata considerata uno pseudo-componente la cui formula bruta è $C_xH_yO_zN_w$, i cui coefficienti x, y, z e w possono desumersi dalle analisi, normalizzando il tutto rispetto al contenuto di carbonio e ottenendo il seguente risultato, ovviamente su base priva di acqua:

- Gusci di mandorle: $C_{1.582}H_{0.684}O_{0.008}N_{0.008}$
- Digestato: $C_{1.525}H_{0.444}O_{0.09}N_{0.09}$
- Alghe: $C_{1.664}H_{0.146}O_{0.03}N_{0.03}$

Tabella 28. Composizione delle biomasse oggetto della sperimentazione

	Gusci % [w/w _{dry}]	Digestato % [w/w _{dry}]	Alghe % [w/w _{dry}]
Carbonio	47,8	29,5	41,8
Idrogeno	6,3	3,75	5,8
Ossigeno	43,6	17,5	50,9
Azoto	0,44	3,1	1,5
Cloro	0,018	0,4	0
Zolfo	0,028	1,05	0
LHV [MJ/kg]	17,2	0,32	8,3
Umidità [%w/w]	9	97,0	76,6

Il bilancio di materia in condizioni di equilibrio termodinamico assume che possano formarsi e rimanere in equilibrio una serie di preposti in fase gassosa, riportati in Tabella 29, oltre al carbonio solido, che può essere interpretato come "precursore" della formazione dei residui carboniosi (char).

Tabella 29. Componenti ipotizzati all'equilibrio dopo la gassificazione con acqua supercritica

No.	Specie	Formula	Stato di aggregazione	No.	Specie	Formula	Stato di aggregazione
1	Ossigeno	O ₂	gas	12	Propano	C ₃ H ₈	gas
2	Idrogeno	H ₂	gas	13	Etano	C ₂ H ₆	gas
3	Acqua	H ₂ O	gas	14	Etilene	C ₂ H ₄	gas
4	Metano	CH ₄	gas	15	Metanolo	CH ₃ OH	gas
5	Monossido di Carbonio	CO	gas	16	Acetilene	C ₂ H ₂	gas
6	Biossido di carbonio	CO ₂	gas	17	Metil-acetilene	C ₃ H ₄	gas
7	Ossido di azoto	N ₂ O	gas	18	Propilene	C ₃ H ₆	gas
8	Ammoniaca	NH ₃	gas	19	Benzene	C ₆ H ₆	gas
9	Monossido di Azoto	NO	gas	20	Naftalene	C ₁₀ H ₈	gas
10	Biossido di Azoto	NO ₂	gas	21	Formaldeide	CH ₂ O	gas
11	Azoto	N ₂	gas	22	Carbonio	C	solido

Le condizioni operative sono state scelte in accordo con i risultati delle attività precedenti ed il bilancio di energia è stato risolto per ognuno dei sistemi a valle della risoluzione dell'equilibrio termodinamico. Al fine di favorire un'analisi comparativa efficace, i risultati sono proposti in termini di composizione di equilibrio su base priva di acqua, in modo da evidenziare la presenza dei composti di interesse.

L'analisi dei risultati ha fornito interessanti evidenze del vantaggio nell'utilizzo di alghe, per via dell'impatto positivo della diluizione sul tenore di idrogeno, oltre ad una sostanziale stabilità dei prodotti di gassificazione al di sopra di una temperatura operativa di soglia. Inoltre sono stati mostrati gli effetti delle differenti composizioni di alimentazione sulle caratteristiche energetiche del processo, confermando la modesta incidenza della

compressione della fase liquida e la variabilità della potenza energetica in gioco in funzione della tipologia di alimentazione.

In merito al processo di gassificazione è emerso un comportamento qualitativamente simile per le tre biomasse utilizzate, ovvero con una dipendenza della qualità del gas dalle condizioni operative e dalla diluizione. In particolare le alghe, in virtù di una maggiore umidità, presentano una resa di idrogeno all'equilibrio maggiore rispetto agli altri materiali utilizzati ed un significativo decremento della frazione di anidride carbonica prodotta, a tutto vantaggio della qualità energetica del syngas ottenibile.

In merito alle considerazioni che scaturiscono dal bilancio di energia, è stata confermata la ridotta incidenza della compressione del liquido rispetto alla quantità di energia potenzialmente recuperabile dall'espansione del gas. Inoltre, le diverse biomasse presentano differenze apprezzabili nella quantità di energia richiesta dal processo e nel LHV del gas ottenuto in ragione della composizione, facendo preferire composizioni di materia prima più ricche in idrogeno rispetto al carbonio, il quale tende a ritrovarsi nel syngas prodotto come CO₂.

b. Sviluppo di sistemi di clean-up e upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale

b.1 Ottimizzazione dei parametri di funzionamento del reattore di desolfurazione

Sulla base dei risultati ottenuti dalle attività di ricerca svolte nella precedente annualità della RdS presso l'Università di Salerno con l'obiettivo di sviluppare dispositivi catalitici per l'abbattimento dell'H₂S presente nel biogas, è stato condotto uno studio volto alla scelta del supporto strutturato (carrier) ottimale per la preparazione del catalizzatore e, successivamente, al dimensionamento del reattore catalitico per il trattamento di una portata di biogas fino a 500 NL/h [rapporto RdS/2013/175].

La formulazione di questi catalizzatori è stata effettuata a partire da un supporto a base di cordierite con struttura a nido d'ape caratterizzato da 226 cpsi (celle per pollice quadrato) e utilizzando un washcoat commerciale a base di ceria e zirconia, rispettivamente quali supporto strutturato e supporto per le specie attive per la preparazione del catalizzatore finale.

Nella precedente annualità, sono state condotte le prove di attività catalitica su due monoliti catalizzati e sul supporto tal quale. I risultati di tale studio hanno evidenziato che il supporto non ha alcuna attività catalitica, mentre buone prestazioni sono state ottenute per i campioni di catalizzatori strutturati a base di vanadio nell'intervallo di temperatura 150-200 °C. Dal confronto (effettuato a T = 200 °C) tra i catalizzatori in polvere ed i catalizzatori strutturati è emerso che questi ultimi hanno mostrato un'attività catalitica più elevata di quella riscontrata per i campioni in polvere e concentrazioni di SO₂ inferiori a 10 ppm.

Nella prima fase delle attività previste dal PAR 2012, sulla base dei risultati preliminari ottenuti in precedenti ricerche, il lavoro è stato incentrato sull'individuazione dello spessore ottimale di washcoat e del carico ottimale di fase attiva (V₂O₅). Inoltre, nella parte sperimentale, si è anche verificata la possibilità di preparare il catalizzatore strutturato secondo un metodo alternativo (impregnazione congiunta) e apparentemente più rapido rispetto a quello precedentemente proposto (impregnazione disgiunta). Pertanto, nella preparazione dei campioni strutturati sono state impiegate due diverse tecniche: in un caso si è scelto di partire da un washcoat a cui erano stati già aggiunti i sali precursori delle specie attive (metodo 1), e nell'altro aggiungendo le specie attive solo dopo la fase di deposizione del washcoat sul monolite, mediante impregnazione in una soluzione del sale precursore (metodo 2).

Nella seconda parte i campioni preparati sono stati caratterizzati mediante diverse tecniche, quali analisi XRD, SEM-EDAX, analisi ED-XRF, adsorbimento di azoto a 77 K, porosimetria a mercurio; in particolare, la tecnica basata sulla spettroscopia Raman è stata utilizzata per caratterizzare i campioni preparati nelle due modalità differenti al fine di individuare le specie chimiche presenti, ed avere informazioni sull'efficacia dei metodi di preparazione.

In seguito sono state eseguite prove di attività catalitica per individuare le condizioni operative ottimali al fine di ottenere un'elevata efficienza di abbattimento dell'H₂S e la minima resa ad SO₂ per poi procedere al dimensionamento del reattore catalitico.

Nel corso delle prove, i campioni preparati con il metodo 1 non hanno manifestato un'elevata efficienza di abbattimento dell'H₂S (x_{H₂S} = 77%) alla temperatura di 200 °C e al contempo sono risultati poco stabili, mostrando una forte tendenza alla disattivazione.

I risultati ottenuti dai campioni preparati con il metodo 2 nell'intervallo di temperatura di 150-200 °C, aventi rispettivamente un carico di V₂O₅ pari al 2, 8 e 19%, sono stati simili in termini di efficienza di conversione dell'H₂S e di selettività ad SO₂; infatti la conversione di H₂S è risultata sempre molto prossima ai limiti termodinamici,

essendo pari a circa il 90%, con risultati analoghi anche per la selettività ad SO_2 che è risultata sempre molto bassa, con valori inferiori al 2% anche a 200 °C.

Le prove di caratterizzazione hanno consentito di individuare le motivazioni alla base della differente reattività dei diversi campioni prodotti. Infatti, per i campioni preparati con il metodo dell'impregnazione congiunta, è stata verificata una notevole formazione di vanadato di cerio (CeVO_4) ottenuta probabilmente già durante la fase di impregnazione e poi di essiccazione e calcinazione, per reazione tra la ceria e i precursori dell'ossido di vanadio.

La migliore attività catalitica riscontrata per i campioni preparati con il metodo dell'impregnazione disgiunta (metodo 2) è stata attribuita alla presenza di forme aggregate di pentossido di vanadio (V_2O_5) che, secondo quanto riportato in letteratura, tra le specie del vanadio, sono le forme più attive e selettive per questo tipo di reazione. Pertanto, dopo aver svolto tutte le attività sperimentali per individuare la tecnica più efficace per la preparazione dei catalizzatori strutturati a nido d'ape per la reazione di ossidazione parziale selettiva di H_2S , sono state condotte prove di adesione del washcoat e di attività catalitica i cui risultati hanno evidenziato che, a partire da monoliti di cordierite con 226 cps, e con un washcoat a base di ceria, zirconia e allumina, è possibile preparare dei catalizzatori strutturati capaci di ossidare in modo selettivo H_2S , in condizioni di alimentazione stechiometrica ottenendo valori di conversione di H_2S e selettività molto prossime ai limiti termodinamici, e rispettivamente pari a circa il 90% e il 2% a 200 °C a partire da una concentrazione iniziale di H_2S pari a 500 ppm.

Preparazione dei catalizzatori strutturati

I catalizzatori strutturati sono normalmente costituiti da tre componenti:

- supporto strutturato;
- washcoat - strato di materiale poroso depositato sul supporto che diventa, a sua volta, supporto per l'elemento attivo;
- specie catalitica attiva.

Il supporto strutturato deve possedere elevata stabilità termica e meccanica e garantire un'elevata dispersione delle specie attive, evitando eventuali fenomeni di sinterizzazione.

I catalizzatori strutturati vengono generalmente preparati a partire da monoliti e schiume ceramiche. I monoliti utilizzati generalmente sono a base di cordierite ($2\text{MgO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) e sono caratterizzati da una struttura geometrica a nido d'ape con tanti canali paralleli che garantiscono un'elevata superficie di contatto gas/solido per unità di volume del catalizzatore e basse perdite di carico anche con portate elevate in alimentazione. Tuttavia, i monoliti presentano anche degli svantaggi legati alla bassa conducibilità termica in direzione radiale e all'assenza di interconnessioni tra i canali.

Il washcoat è costituito principalmente da un ossido inorganico. Le proprietà richieste sono:

- buona adesione al supporto
- alta uniformità
- buona stabilità termica
- buona adesione da parte della specie attiva
- assenza di reattività della specie attiva nei confronti del supporto
- elevata area superficiale.

Prima di depositare il washcoat, è necessario effettuare il pretrattamento del supporto al fine di migliorare l'adesione dello strato catalitico. Tale pretrattamento ha lo scopo di creare, sulla superficie del supporto, uno strato di ossido o siti di ancoraggio per il washcoat, oppure di stabilizzare la fase cristallina caratterizzante il supporto.

I metodi più comuni per depositare uno strato di washcoat su un supporto ceramico sono l'impregnazione, o dipcoating, con una soluzione dell'ossido inorganico e la deposizione-precipitazione da sospensioni, sol-gel o composti misti. È necessario effettuare, inoltre, più impregnazioni ripetute, per non dover utilizzare una soluzione iniziale più concentrata, la cui elevata densità impedirebbe la formazione di uno strato di washcoat uniforme e ben coeso.

L'elevata macroporosità dei supporti ceramici determina un buon risultato nell'operazione di dipcoating, che è la tecnica generalmente utilizzata nel caso dei monoliti. Tale tecnica consiste nell'immersione del supporto in una sospensione o slurry, seguita da estrazione a velocità controllata ed essiccazione. Una tecnica alternativa al dipcoating è lo spray-coating, che consiste nell'applicare al supporto in maniera uniforme uno spray della polvere presente nella sospensione.

Con entrambi i metodi è possibile ottenere lo stesso spessore di washcoat: ovviamente sono differenti sia le applicazioni, sia le composizioni delle sospensioni di partenza. La sospensione di partenza è generalmente composta da polveri di ossidi inorganici, leganti, acidi come agenti peptizzanti e solvente (di solito acqua).

Qualunque sia la metodologia di preparazione, di fondamentale importanza risulta la fase di eliminazione del solvente, che alla fine determina le proprietà morfologiche e di resistenza meccanica dello strato di ossido finale. Tale operazione viene solitamente effettuata tramite lenta essiccazione, alla quale segue la fase di calcinazione al fine di stabilizzare la fase cristallina dello strato di ossido depositato e le relative proprietà chimiche, termiche e meccaniche.

Molto importanti risultano anche le proprietà termiche del washcoat. Il differente coefficiente di dilatazione termica del washcoat rispetto al supporto, infatti, può essere la causa della formazione di crepe profonde nella struttura dello stesso, di perdita di aderenza e del suo distacco dal supporto ceramico.

In letteratura esistono differenti esempi di washcoat da depositare su supporti ceramici. Le metodologie di preparazione, i metodi di deposizione, i precursori utilizzati e le composizioni delle soluzioni sono molto variegata, ma i vari washcoat sono basati sull'utilizzo di quattro differenti sostanze: allumina, perovskite, ossido di cerio o zeoliti.

Il materiale di base più comunemente usato per la preparazione di washcoat è la $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ che presenta, però, il difetto di essere poco stabile alle alte temperature e di subire transizioni di fase a temperature superiori a 700 °C fino a dare la forma termodinamicamente stabile di $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ oltre i 1000 °C. Quest'ultima è caratterizzata da una bassa area superficiale ed il suo impiego può essere limitato a scopi in cui viene richiesto al supporto un'elevata resistenza meccanica piuttosto che un'elevata dispersione delle specie attive.

Anche la dimensione delle particelle di polvere, utilizzata nella preparazione del washcoat, ha influenza sulle proprietà chimico-fisiche del campione ottenuto. Infatti, la riduzione delle dimensioni delle particelle di polvere deve essere spinta fino a pochi micron (2-5 μm) per assicurare un'adesione del washcoat depositato comparabile a quella dei catalizzatori commerciali.

La deposizione della specie attiva può essere effettuata con tecniche quali impregnazione, scambio ionico e deposizione-precipitazione. L'impregnazione con una soluzione del sale precursore della specie attiva è tuttavia il metodo più semplice e viene generalmente preferito perché assicura la riproducibilità dei campioni garantendo il controllo del carico depositato.

La preparazione dei catalizzatori strutturati è stata effettuata da supporti ceramici di cordierite ($2\text{MgO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) in forma di monolite a nido d'ape da 226 cpsi. I monoliti sono stati immersi nel washcoat di tipo commerciale, fornito da ECOCAT, avente una percentuale in peso di solidi iniziale (ossidi di cerio e di zirconio) pari a 43,39%. Per la deposizione della specie attiva (V_2O_5) è stato utilizzato come sale precursore il metavanadato di ammonio (NH_4VO_3).

Allo scopo di valutare l'influenza della calcinazione del supporto sull'adesione dello strato di washcoat, l'operazione di dipcoating è stata realizzata inizialmente su supporti calcinati. L'operazione di calcinazione è stata eseguita in un forno a muffola in aria a 550 °C per 2 ore.

Allo scopo di facilitare la procedura di dipcoating ottenendo uno strato omogeneo di washcoat, si è proceduto a una diluizione con acqua bidistillata del materiale di partenza fino ad ottenere una percentuale di solidi pari al 30%. Successivamente, è stata realizzata la procedura di dipcoating, immergendo il supporto nello slurry per 10 minuti a temperatura ambiente e, trascorso il tempo prestabilito, il supporto è stato rimosso dallo slurry e l'eccesso di slurry è stato asportato tramite aspirazione. Al termine di questa procedura, i campioni sono stati essiccati in stufa a 120 °C per trenta minuti.

L'impregnazione della fase attiva nel washcoat è stata condotta con due modalità differenti al fine di valutare il metodo di preparazione ottimale mediante le prove di attività catalitica.

I due metodi di preparazione utilizzati sono:

- impregnazione congiunta della fase attiva con il washcoat;
- impregnazione della fase attiva dopo la deposizione e stabilizzazione del washcoat.

Impregnazione congiunta della fase attiva con il washcoat (metodo 1)

Con il metodo dell'impregnazione congiunta, sono stati preparati tre campioni con spessore di washcoat variabile (50-150-226 μm).

La soluzione del sale precursore della fase attiva (0,02 M) è stata aggiunta direttamente nel washcoat e tenuta in agitazione per circa 30 minuti alla temperatura di 100 °C. In seguito, sono state effettuate le impregnazioni a caldo

(100 °C) per 15 minuti dei monoliti. Dopo ogni fase di impregnazione, i monoliti sono stati essiccati a 120 °C in stufa per 30 minuti e le operazioni sono state ripetute più volte, registrando il peso iniziale del supporto ed il peso dopo ciascuna impregnazione ed essiccazione per valutare il quantitativo di washcoat depositato. Successivamente i campioni sono stati calcinati in aria a 400 °C per 2h (10 °C/min).

Impregnazione della fase attiva dopo deposizione del washcoat (metodo 2)

Questo metodo di preparazione è stato utilizzato per ottenere campioni con un differente carico di fase attiva (V_2O_5), variabile tra il 2 e il 20%, al fine di individuare il carico ottimale rispetto alla reazione di ossidazione parziale di H_2S a zolfo in termini di prestazioni catalitiche.

L'impregnazione dei monoliti con la soluzione del sale precursore della fase attiva è stata effettuata in seguito alla deposizione e stabilizzazione del washcoat mediante calcinazione (550 °C, 2 h). È stata preparata una soluzione 0,5 M, più concentrata rispetto alle precedenti, per consentire, mediante un numero non troppo elevato di impregnazioni, di ottenere il carico di vanadio desiderato. I campioni sono stati impregnati a caldo alla temperatura di 70 °C per 15 minuti e, successivamente, sono stati essiccati a 120 °C in stufa per 30 minuti. Inoltre, al termine di ogni ciclo impregnazione/essiccazione, i campioni sono stati calcinati a 400 °C per 2 h, onde evitare che il sale depositato potesse sciogliersi nuovamente nella soluzione nelle impregnazioni successive. Queste operazioni sono state ripetute fino al raggiungimento del carico di fase attiva desiderato.

Per la determinazione dello spessore ottimale di washcoat in funzione dell'attività catalitica, sono stati preparati tre campioni con spessori di washcoat rispettivamente pari a 50, 150 e 226 μm corrispondenti rispettivamente ad una massa di washcoat di 0,07, 0,200 e 0,246 g.

Le prove sui tre campioni sono state effettuate alimentando 500 ppm di H_2S , alla temperatura di 200 °C e lavorando con un tempo di contatti pari ad 8 ms, in condizioni lontane dall'equilibrio, in modo da poter apprezzare la variazione di conversione dell' H_2S al variare dello spessore di washcoat. L'andamento della conversione di H_2S con lo spessore di washcoat è riportato in Figura 106. Si nota una diminuzione della conversione di H_2S per spessori maggiori di 150 μm probabilmente dovuta all'instaurarsi di fenomeni di diffusione interna all'interno del washcoat. Per questo motivo, i campioni successivi saranno preparati con uno spessore di washcoat compreso tra 50 e 150 μm .

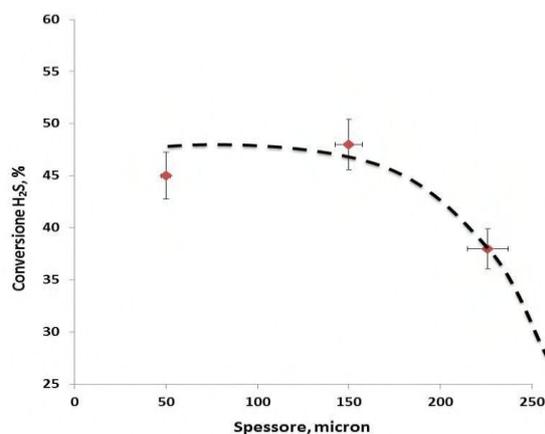


Figura 106. Determinazione dello spessore ottimale di washcoat ($O_2/H_2S = 0,5$; $T = 200$ °C; $Q = 800$ Ncm^3/min)

I catalizzatori preparati sono stati caratterizzati attraverso analisi termogravimetrica, diffrazione di raggi X, spettroscopia Raman, microscopia a scansione elettronica, analisi ED-XRF e sono state eseguite misure di area superficiale specifica e di porosità.

In particolare, la tecnica della microscopia a scansione elettronica è stata utilizzata per analizzare direttamente l'omogeneità dello strato di washcoat e l'eventuale presenza di macroporosità del supporto. Sono state riprese immagini a diversi ingrandimenti di un campione di cordierite calcinata (Figura 107). Da tali immagini viene evidenziata la struttura a canali del supporto (Figure 107a e 107b). Ad ingrandimenti ancora maggiori spicca invece la struttura della cordierite, caratterizzata da pori di elevate dimensioni (Figure 107c e 107d).

La SEM è stata successivamente utilizzata anche per la caratterizzazione di un campione di cordierite sul quale è stato depositato lo strato di washcoat. Le immagini ottenute confermano la deposizione di uno strato omogeneo ed uniforme di washcoat nei canali della cordierite

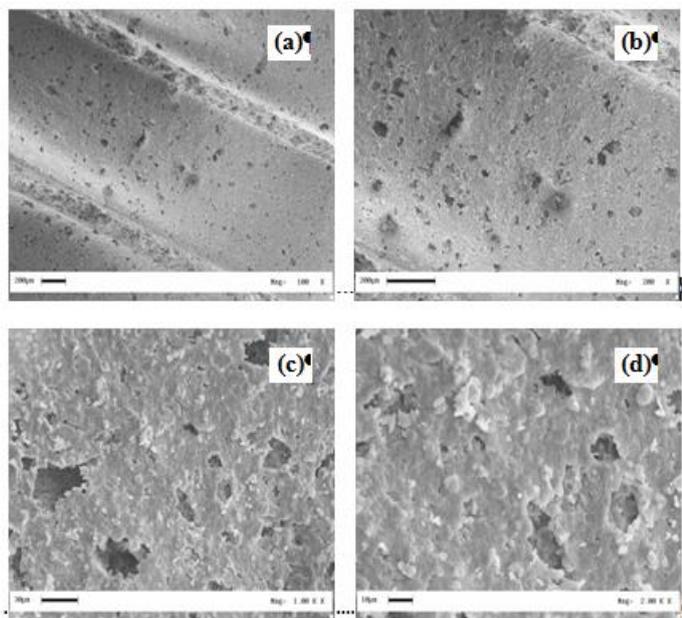


Figura 107. Immagini SEM campioni di cordierite calcinata

(Figure 108a e 108b). In ulteriori immagini (Figura 108c) si evidenzia che la deposizione del washcoat porta al completo ricoprimento delle macroporosità della cordierite, che hanno costituito ulteriori punti di ancoraggio per lo strato di washcoat depositato.

Per ingrandimenti maggiori (Figura 108d), le immagini mostrano la presenza di microcrepe anche sullo strato di washcoat, le quali, secondo la letteratura, se di estensione ridotta come nel caso specifico, costituiscono a loro volta ulteriori punti di ancoraggio per la specie attiva e generano altra superficie disponibile per la reazione chimica.

Dai risultati ottenuti dalle diverse prove di caratterizzazione è stato possibile calcolare uno spessore di parete pari a circa 0,2 mm e un'ampiezza del canale pari a 1 mm.

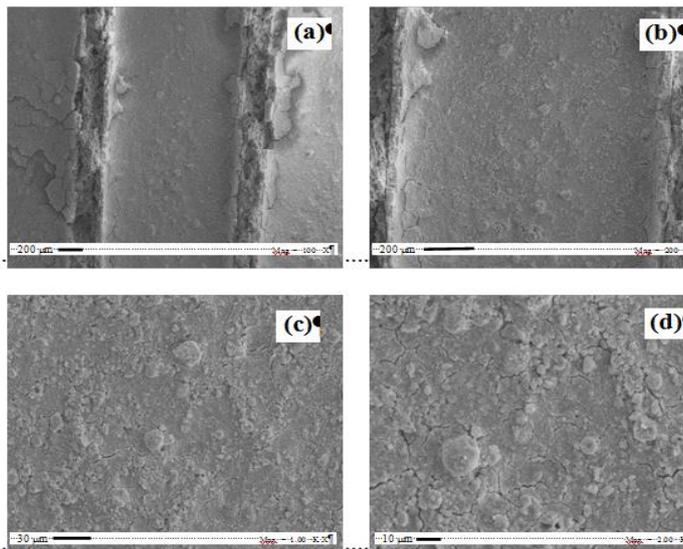


Figura 108. Immagini SEM per campioni di cordierite calcinata con washcoat

Impianto sperimentale da laboratorio e condizioni operative delle prove di attività catalitica

Le prove sono state condotte utilizzando un impianto da laboratorio, il cui schema è riportato in Figura 109.



Figura 109. Schema dell'impianto sperimentale da laboratorio

Il sistema di alimentazione prevede tre linee distinte: una per l'alimentazione della miscela H₂S-N₂, un'altra per l'alimentazione dell'aria che occorre alla reazione di ossidazione e un'altra ancora per inviare l'azoto di diluizione. Un sistema di valvole consente di inviare l'alimentazione al reattore e gli effluenti alla sezione di analisi oppure, in posizione di by-pass, di inviare N₂ di lavaggio al reattore e l'alimentazione alla sezione di analisi in modo da verificarne la composizione.

L'alimentazione dell'H₂S è realizzata mediante uno specifico riduttore di pressione montato direttamente sulla bombola, resistente alle sostanze acide, e presenta una zona di lavaggio con N₂ nel caso di fermo dell'impianto. Per alimentare la portata desiderata, per ogni gas vengono utilizzati controllori di portata massica (MFC), in grado di realizzare il flusso richiesto.

Il reattore è realizzato in acciaio ed è costituito da un tubo lungo 21 cm e di diametro interno 14 mm posizionato all'interno di un forno (Figura 110).

Il forno presenta una zona isoterma di 4 cm, con una variazione di ± 1 °C. Il catalizzatore è posizionato all'interno della zona isoterma del forno. L'alloggiamento del monolite all'interno del reattore è



Figura 110. Reattore catalitico e forno di riscaldamento

riportato nell'immagine seguente (Figura 111).

Un lettore di temperatura viene utilizzato per monitorare in continuo la temperatura del letto catalitico. La termocoppia è posizionata all'interno di una guaina in acciaio del diametro interno di 6 mm concentrica al reattore.

H₂S e O₂ presenti nella corrente in uscita dal reattore vengono inviati in uno spettrometro di massa. Per evitare che eventuali vapori di zolfo possano accidentalmente raggiungere l'interno dell'analizzatore e causare l'occlusione del capillare e il danneggiamento di parti fondamentali, prima dell'ingresso della corrente nello strumento è stata collocata una specifica trappola che condensa selettivamente lo zolfo eventualmente presente nella corrente gassosa da analizzare. Solitamente, la maggior parte dello zolfo si deposita nella sezione di uscita del reattore, che è chiaramente la zona fredda essendo a temperature inferiori a 100 °C. La concentrazione di SO₂, eventualmente presente nella corrente in uscita dal reattore è monitorata invece da un analizzatore FT-IR multigas in continuo.

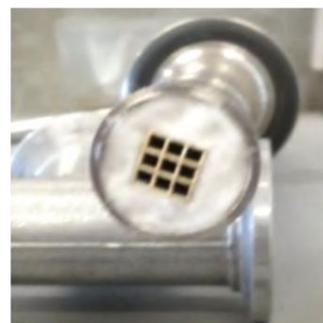


Figura 111. Monolite caricato nel reattore

Le prove di attività catalitica sono state effettuate nelle seguenti condizioni operative:

- Pressione = 1 atm
- Temperatura di reazione = 150 - 200 °C
- Concentrazione H₂S in ingresso = 500 ppm
- Rapporto di alimentazione O₂/H₂S = 0,5
- Portata totale = 400 Ncm³/min.

Le prove di attività catalitica sono state effettuate sui campioni, preparati con i due metodi, allo scopo di individuare il migliore per la formulazione del catalizzatore finale. In un secondo momento è stato valutato l'effetto del carico di fase attiva (V₂O₅) in termini di attività catalitica e selettività a zolfo.

I risultati delle prove di attività sono riportati in termini di conversione di H₂S, O₂ e selettività a SO₂ e sono espressi mediante le seguenti equazioni:

$$x_{\text{H}_2\text{S}} (\%) = ((\text{H}_2\text{S}^{\text{IN}} - \text{H}_2\text{S}^{\text{OUT}}) / \text{H}_2\text{S}^{\text{IN}}) \cdot 100$$

$$x_{\text{O}_2} (\%) = ((\text{O}_2^{\text{IN}} - \text{O}_2^{\text{OUT}}) / \text{O}_2^{\text{IN}}) \cdot 100$$

$$y_{\text{SO}_2} (\%) = (\text{SO}_2^{\text{OUT}} / (\text{H}_2\text{S}^{\text{IN}} - \text{H}_2\text{S}^{\text{OUT}})) \cdot 100$$

dove H₂S, O₂ e SO₂, sono rispettivamente le concentrazioni in ppm dei diversi composti.

Effetto del metodo di preparazione. Impregnazione congiunta

L'effetto del metodo di preparazione mediante impregnazione congiunta del sale precursore nel washcoat è stato analizzato su di un campione avente uno spessore di washcoat pari a 70 μm, corrispondente ad una massa depositata di washcoat catalizzato di 80 mg. La prova è stata condotta a 200 °C e gli andamenti dei profili di concentrazione sono riportati in Figura 112.

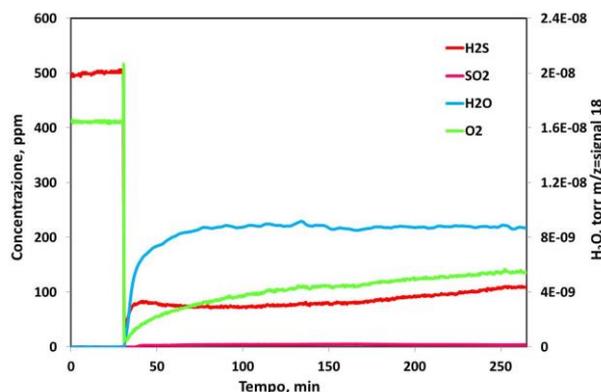


Figura 112. Prova di attività catalitica condotta sul campione preparato per impregnazione congiunta a T = 200 °C

La miscela di alimentazione è inviata inizialmente in by-pass al reattore per circa 30 minuti al fine di ottenere valori di concentrazione stabili dei reagenti rispettivamente pari a 500 ppm per l'H₂S e a 400 ppm per l'ossigeno. La brusca diminuzione della concentrazione dei reagenti e l'aumento della concentrazione dei prodotti denota l'invio della miscela di alimentazione al reattore.

I profili di concentrazione dell'H₂S e dell'O₂ denotano una tendenza del catalizzatore alla disattivazione: infatti non si osserva il raggiungimento di valori stazionari per l'H₂S e l'O₂ durante l'intera prova, della durata di circa 5 ore.

La concentrazione di SO₂ assume, invece, un valore costante sin dall'inizio della prova e per tutta la durata della stessa, come pure per il segnale relativo alla formazione di acqua.

Il transitorio osservato per i reagenti può essere imputabile al metodo di preparazione utilizzato e, probabilmente, alla specie CeVO₄ presente sulla superficie del catalizzatore, poco attiva verso la reazione di ossidazione parziale selettiva di H₂S.

Effetto del metodo di preparazione. Deposizione della fase attiva

La tecnica di preparazione basata sulla deposizione della specie attiva sul washcoat, mediante impregnazione in una soluzione del sale precursore effettuata successivamente alla deposizione del washcoat sul monolite (metodo 2), è stata utilizzata per la preparazione di sei campioni con carico di V₂O₅ variabile tra il 2 e il 19%.

In particolare, le prove di attività al variare del carico di vanadio sono state effettuate sui campioni aventi un carico di fase attiva pari al 2% (campione 2), 8%, (campione 8) e 19% (campione 19) al fine di effettuare un confronto in termini di prestazioni catalitiche. L'effetto della temperatura (150-200 °C) è stato valutato sui diversi campioni in termini di conversione di H₂S e selettività ad SO₂. I risultati della prova effettuata sul campione 2 alla temperatura di 200 °C sono riportati in Figura 113.

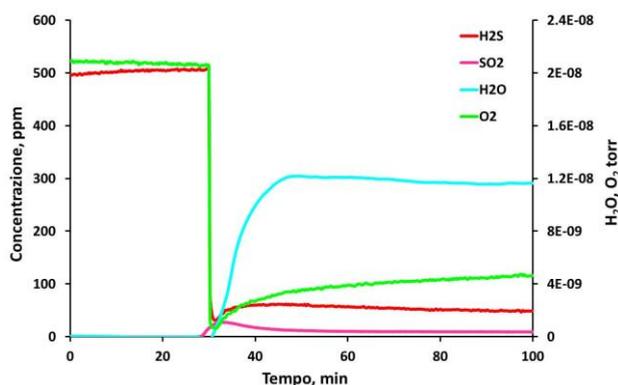


Figura 113. Prova di attività catalitica condotta sul campione 2 (metodo 2) a T = 200 °C

Nel corso della prova è stata riscontrata una buona attività catalitica e un'elevata stabilità. Infatti, dai profili di concentrazione di H₂S e dal frammento dell'ossigeno, è possibile notare il raggiungimento di valori stazionari appena dopo 30 minuti di prova con una conversione finale di H₂S pari al 90%. A questa temperatura è stata ottenuta anche una bassa formazione di SO₂, la cui concentrazione sin da subito ha raggiunto un valore di regime pari a 10 ppm.

Le prove effettuate sul campione con il più alto carico di fase attiva (19%) non hanno mostrato risultati differenti da quelli riportati sul campione con più basso carico, soprattutto alla temperatura di 200 °C, in cui la conversione di H₂S è stata pari al 92% e la selettività ad SO₂ sempre molto bassa (≈ 2%). Anche in questo caso, durante l'intera durata della prova (circa 2 ore), il campione non ha mostrato fenomeni di disattivazione.

Alla luce dei risultati ottenuti dai tre campioni provati, è emerso che buone prestazioni catalitiche, soprattutto in termini di conversione di H₂S, sono state osservate alla temperatura di 200 °C. Il riepilogo dei valori di conversione di H₂S, concentrazione di SO₂ in uscita e selettività a zolfo sono riportati nella Tabella 30.

Tabella 30. Confronto delle prestazioni dei campioni preparati mediante deposizione della fase attiva sul washcoat alla temperatura di 200 °C

Campione	Conversione di H ₂ S, %	SO ₂ ppm	Selettività a zolfo, %
Campione 2	88	10	97,7
Campione 8	90	8	98,2
Campione 19	92	10	97,8

Come si evince dai dati riportati in tabella, non è possibile apprezzare significative differenze tra i campioni al variare del carico di fase attiva, in quanto tutti e tre sono risultati attivi, stabili e con una buona efficienza di abbattimento dell'H₂S e una bassissima selettività ad SO₂, a partire da una concentrazione in ingresso di 500 ppm.

A 150 °C non ci sono state sostanziali differenze per quanto riguarda la selettività ad SO₂, mentre si è verificato un calo nella conversione di H₂S che è risultata pari all'80%.

Considerazioni conclusive

Le attività di ricerca svolte hanno riguardato lo studio sulla preparazione di catalizzatori strutturati per l'ossidazione parziale selettiva di H₂S presente nel biogas con l'obiettivo di individuare la formulazione ottimale per la preparazione di un catalizzatore di geometria tale da poter essere testato sperimentalmente sull'impianto pilota DMM6000, e che dovrà pertanto essere in grado di processare una corrente di biogas reale dell'ordine dei 500 NL/h.

E' stato effettuato uno studio bibliografico riguardante le tipologie dei supporti tipicamente impiegati, le procedure di preparazione, i metodi di deposizione del washcoat e della fase attiva e le problematiche inerenti ciascun metodo di preparazione. Successivamente, sono stati scelti rispettivamente un monolite di cordierite con struttura a nido d'ape caratterizzato da 226 cpsi ed un washcoat commerciale a base di ceria e allumina, quale supporto strutturato e supporto per le specie attive per la preparazione del catalizzatore finale.

È stato dimostrato che il metodo del dipcoating, se condotto con cicli di deposizione, essiccazione e calcinazione, consente di ottenere gli spessori desiderati (50-150 µm), con una ottima stabilità meccanica in termini di adesione.

Nella preparazione dei campioni strutturati sono stati impiegate due diverse tecniche: in un caso si è scelto di partire da un washcoat a cui erano stati già aggiunti i sali precursori delle specie attive, e nell'altro aggiungendo le specie attive solo dopo la fase di deposizione del washcoat sul monolite mediante impregnazione in una soluzione del sale precursore.

Gli spettri Raman ottenuti sui campioni preparati con le due tecniche hanno evidenziato la formazione di specie differenti, probabilmente responsabili della diversa attività catalitica riscontrata nelle prove al variare della temperatura.

In particolare, per i campioni preparati con il metodo dell'impregnazione congiunta, non sono state individuate specie VO_x (monovanadati e polivanadati) e neanche forme cristalline di vanadio (V₂O₅), ma la specie vanadato di cerio (CeVO₄), ottenuta probabilmente durante la fase di calcinazione per reazione tra la ceria e l'ossido di vanadio. Nel corso delle prove sperimentali di conversione, tali campioni non hanno manifestato un'elevata efficienza di abbattimento dell'H₂S (x_{H₂S} = 77%) alla temperatura di 200 °C e al contempo sono risultati poco stabili, mostrando una forte tendenza alla disattivazione.

Differenti risultati sono stati riscontrati sui campioni preparati con l'altro metodo, in cui sono stati identificati, mediante la spettroscopia Raman, picchi attribuibili all'ossido di vanadio. Per questi campioni è stato studiato anche l'effetto del carico di vanadio (2 - 19%) al variare della temperatura (T = 150-200 °C).

In particolare per i 3 campioni provati, aventi un diverso carico di V₂O₅ (2, 8 e 19%), i risultati sono stati simili in termini di efficienza di conversione dell'H₂S e di selettività ad SO₂: infatti la conversione di H₂S è stata uguale o prossima al 90% e la selettività ad SO₂ è risultata molto bassa anche a 200 °C (≈ 2%). L'assenza di variazioni significative nelle prestazioni catalitiche, in relazione alla differente percentuale di fase attiva, può essere ricondotta all'utilizzo di condizioni operative (T = 150-200 °C) molto vicine all'equilibrio termodinamico.

E' possibile concludere che i migliori risultati ottenuti sono legati ad una maggiore uniformità della distribuzione delle specie attive, legata alla maggiore solubilità del sale nella soluzione acquosa rispetto al washcoat, unitamente alla presenza di forme aggregate di vanadio che inibiscono la formazione di SO₂.

In definitiva, è stata ottimizzata una tecnica di preparazione di catalizzatori strutturati, e sono state condotte prove di adesione del washcoat e di attività catalitica per cui è stato dimostrato sperimentalmente che a partire da monoliti di cordierite con 226 cpsi, e con un washcoat a base di ceria, zirconia e allumina, è possibile preparare dei catalizzatori strutturati capaci di ossidare in modo selettivo l'H₂S, con conversioni di circa il 90% a 200 °C e bassissime selettività ad SO₂ a partire da una concentrazione iniziale di H₂S pari a 500 ppm.

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti, è stato quindi dimensionato e preparato il catalizzatore strutturato da impiegare nel reattore pilota di desolfurazione del Centro Ricerche ENEA Casaccia di Roma. Il dimensionamento è stato effettuato considerando una portata di biogas da trattare pari a 500 NL/h.

Il catalizzatore è caratterizzato da una struttura a nido d'ape in configurazione "through-flow", con 225 canali e uno spessore medio di washcoat pari a 130 micrometri. Gli ultimi due parametri sono particolarmente rilevanti perché il grande numero di canali conduce ad un'elevata superficie per unità di volume consentendo un'elevata conversione, una bassa resa ad SO₂ e un ottimale sfruttamento del catalizzatore con bassissimi valori delle perdite di carico.

Il catalizzatore preparato, mostrato in Figura 114, ha le seguenti caratteristiche:

- Dimensione: 2,8 cm x 2,8 cm x 10 cm
- Metodologia di preparazione: Impregnazione disgiunta (metodo 2)
- Spessore di washcoat: 130 μm
- Carico di fase attiva: 3%.

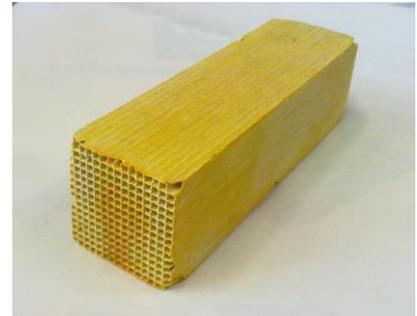


Figura 114. Catalizzatore strutturato da impiegare nel reattore pilota ENEA

È di fondamentale importanza sottolineare che gli ottimi risultati ottenuti in questo lavoro sperimentale sono relativi ad una condizione di alimentazione del reattore catalitico caratterizzata da un rapporto molare di alimentazione stechiometrico per la reazione di ossidazione parziale a zolfo, pari a O₂/H₂S = 0,5.

Tale rapporto, seppure molto facilmente realizzabile in un impianto di digestione perfettamente anaerobico, potrebbe risultare ampiamente maggiore in caso di infiltrazioni d'aria. Infatti, considerando i valori tipici della concentrazione di H₂S, anche in presenza di limitate infiltrazioni di aria, si possono facilmente ottenere rapporti O₂/H₂S molto superiori a 2, con drammatiche conseguenze sulla selettività del sistema.

Pertanto, allo scopo di garantire le buone prestazioni ottenute nelle condizioni di laboratorio riportate in precedenza, si raccomanda, per le future sperimentazioni su una scala maggiore, un attento controllo della concentrazione di ossigeno a monte del reattore catalitico di ossidazione parziale di H₂S a S.

b.2 Verifica del processo per l'abbattimento dell'H₂S mediante la fotosintesi anossigenica

Questa linea di ricerca ha l'obiettivo di abbattere l'idrogeno solforato (H₂S) presente nel biogas tramite il processo di fotosintesi anossigenica operato dal solfobatterio *Chlorobium limicola* e, per verificare la fattibilità di questo processo, è stato monitorato il trend di abbattimento dell'H₂S in colture in batch poste in un illuminatore (Figura 115) dotato di LED monocromatici a diverse lunghezze d'onda [rapporto RdS/2013/183].



Figura 115. Illuminatore a LED per prove con fotobioreattori

La valutazione dello sviluppo della coltura è stata effettuata attraverso l'analisi della batterioclorofilla estrapolando una relazione tra la densità cellulare, determinata attraverso l'osservazione in microscopia ad epifluorescenza, e il contenuto in batterioclorofilla C.

Allo stesso tempo, per evidenziare il trend di abbattimento dell'H₂S, è stato messo a punto un protocollo per l'analisi dei solfuri disciolti mediante un gascromatografo dotato di rivelatore fotometrico a fiamma (GC-FPD), evitando l'impiego di tecniche analitiche più complesse che prevedono l'utilizzo di reagenti pericolosi. In tale modo, è stato possibile monitorare la concentrazione dell'H₂S nella fase liquida e nello spazio dei reattori batch ai quali è stato fornito H₂S puro.

Le metodologie analitiche applicate sono risultate funzionali ed efficaci nell'evidenziare come l'abbattimento dello ione solfuro sia direttamente correlato all'aumento della densità cellulare. In colture appena inoculate, il consumo totale dell'H₂S si ottiene dopo 4-6 giorni a seconda della concentrazione di partenza. In particolare, sono state effettuate prove per verificare la capacità di abbattimento dell'H₂S di colture ben sviluppate ad elevata densità

cellulare (1 x 10⁹ cell/mL) in batches da 100 mL.

A tali colture è stato fornito H₂S puro (circa 5 mL), ne è stato monitorato il consumo ogni 24 ore ed è stato aggiunto nuovamente quando si è osservato il totale abbattimento (coltura in *fed batch*). La Figura 116 mostra come in tutti i casi già dopo 24 ore dall'aggiunta il contenuto di H₂S è fortemente ridotto (< 0,006 mM nella fase liquida, < 57 ppm nello spazio di testa), mentre l'abbattimento totale si ottiene nell'arco di tempo di due giorni.

Per descrivere una cinetica del consumo di H₂S, le misure andrebbero effettuate con maggiore frequenza. Infatti, negli ultimi esperimenti eseguiti con colture dense in condizioni di coltura *fed batch*, l'abbattimento totale potrebbe essere stato già raggiunto tra le 24 e le 48 ore di sperimentazione.

I risultati ottenuti sono in accordo con quanto osservato in studi di altri autori (Ball et al.⁷), evidenziando però una notevole riduzione nei tempi di abbattimento dell'H₂S in colture maggiormente sviluppate. Inoltre, l'utilizzo di LED a lunghezza d'onda selezionata rappresenta una scelta vantaggiosa rispetto all'impiego di sorgenti luminose a incandescenza con consumi energetici più elevati.

Attualmente, in ENEA è allo studio la capacità di abbattimento di un fotobioreattore da 2,5 L alimentato in continuo da biogas contenente 1000 - 2000 ppm di H₂S. I dati ottenuti dalle future sperimentazioni saranno utilizzati come base conoscitiva per la realizzazione di una serie di misure volte ad indagare l'effetto delle singole lunghezze d'onda fornite dai LED e la messa a punto di un reattore alimentato in continuo da biogas a diverse concentrazioni di H₂S.

b.3 Verifica di sistemi di separazione della CO₂ per l'upgrading del biogas a biometano mediante membrane polimeriche commerciali

L'attività sperimentale è stata svolta utilizzando l'impianto di upgrading del biogas mediante tecnologia a membrane, realizzato nell'ambito dell'AdP e attualmente installato presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia, valutando in particolare l'efficienza di tale tecnologia in presenza di inquinanti tipici di un biogas proveniente da digestori anaerobici alimentati da scarti animali, reflui zootecnici e FORSU [rapporto Rds/2013/234].

Nello specifico, in continuazione e implementazione del lavoro della scorsa annualità, consistente in test sperimentali con miscele binarie CH₄/CO₂ nel range di composizione tipica, sono state svolte prove atte a valutare le prestazioni della membrana in caso di presenza di H₂S.

Si è trattato in sostanza di una continuazione del lavoro dello scorso anno, in cui i test sperimentali condotti con biogas simulato costituito da una miscela binaria di solo CH₄ e CO₂ avevano mostrato una buona riproducibilità dei dati sperimentali associata a un'ottima rispondenza con le simulazioni numeriche.

La membrana utilizzata è la stessa impiegata nei test precedenti con una configurazione del tipo *Hollow fiber* in polimero PEEK (polietereterchetone) e shelf life a targa di circa 3 anni in condizioni ordinarie. Il presente lavoro ha permesso di valutare le prestazioni di moduli a membrane polimeriche di questa tipologia nell'ottenimento di biometano a partire da biogas contenente inquinanti come H₂S.

Al fine di estendere la verifica sperimentale in condizioni più vicine a quelle di un biogas reale sono stati condotti test di permeabilità utilizzando un biogas simulato con una composizione chimica che prevedeva una percentuale di H₂S pari allo 0,2%.

I test sperimentali sono stati condotti variando la portata di alimentazione nel range 25-41 kg/h, mentre la pressione è stata variata tra 4 e 8 barg. Per ciascuna prova la linea retentato è stata mantenuta costantemente aperta al fine di ottenere le minime perdite di carico dal lato biometano, mentre per valutare come il ΔP tra alimentazione e permeato potesse influire sui parametri caratteristici di processo si è fatta variare la pressione sul lato permeato. Dai dati sperimentali ottenuti si può dedurre che:

- con pressioni più elevate in alimentazione si sono ottenute purezze in metano più alte fino ad arrivare all'80% v, sebbene a tali test corrispondono gradi di recupero nel range 60-66%;
- relativamente alla selettività nei confronti all'H₂S, nel permeato si ha un minimo di 0,01%v. ed un max di 0,16% v, mentre relativamente alla corrente di retentato si ha un minimo di 0,05% v ed un max di 0,22% v;
- la valutazione della selettività dell'H₂S nella corrente di retentato ha portato risultati in intervalli tra 4,7 e 5,7% v nel permeato, mentre relativamente alla corrente di retentato tale intervallo è tra 0,6 e 1,9% v.
- un confronto finale tra i valori di purezza e selettività ottenuti per i test sperimentali con CH₄ al 54% v, sia per i test dell'annualità presente che per quelli della scorsa annualità, ha mostrato un buon andamento, con elevata riproducibilità dei dati sperimentali e comunque in linea con l'andamento teorico.

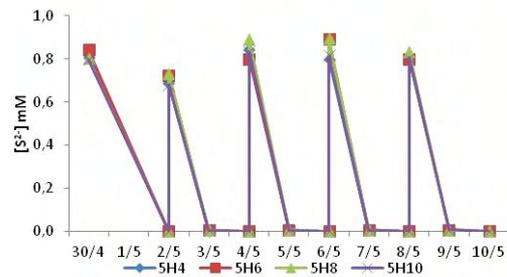


Figura 116. Trend di abbattimento dell'H₂S da parte di colture *fed batch*

⁷ Ball A. S., Nedwell D.B., Perkins R.G., Enzyme and microbial technology, 41(2007), 702-705

In conclusione, anche in presenza di inquinanti come l'H₂S, il processo separativo con membrana PEEK ha mostrato, nonostante i limiti imposti dal processo a singolo stadio, buoni valori di purezza e recupero in metano.

b.4 Studio e sperimentazione di laboratorio di nuovi sistemi per la rimozione selettiva della CO₂

Analisi tecnico-economica di processi innovativi per l'upgrading del biogas a biometano

L'attività, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente della Sapienza Università di Roma, è stata incentrata sulla analisi tecnico-economica di un processo innovativo per l'upgrading del biogas a biometano mediante la formazione e separazione di idrati di CO₂ e sul successivo confronto con un altro processo di possibile interesse, basato sulla cattura della CO₂ per assorbimento con soluzioni di ammine in solventi non acquosi [rapporto RdS/2013/170].

Nella prima fase del lavoro è stata svolta un'accurata ricerca bibliografica e un'analisi critica delle informazioni disponibili sugli equilibri di fase di sistemi contenenti idrati di anidride carbonica e di metano e sulla cinetica di formazione e decomposizione degli idrati stessi.

L'analisi delle condizioni di equilibrio è fondamentale per valutare la fattibilità di un processo di separazione di miscele CO₂-CH₄, come richiesto per l'upgrading del biogas. Inoltre è necessario considerare che il processo di separazione potrebbe utilmente sfruttare differenze nella cinetica di formazione/decomposizione degli idrati, la cui conoscenza è peraltro fondamentale per un corretto dimensionamento delle apparecchiature di separazione.

Relativamente alle condizioni di equilibrio di sistemi H₂O-CO₂-CH₄, si nota che sono ben definite le informazioni sulle condizioni di formazione degli idrati su un diagramma pressione-temperatura: tali dati indicano che l'idrato di CO₂, nell'intervallo di temperatura che può interessare un processo di arricchimento del biogas (tra 0 e 10 °C), si forma in condizioni di pressione meno severe dell'idrato di metano (a 0 °C l'idrato di CO₂ si forma intorno a 10 MPa, mentre l'idrato del metano richiede una pressione di circa 25 MPa).

In presenza di una miscela di CO₂ e CH₄ si forma un idrato contenente i due gas. La curva di formazione/dissociazione dell'idrato, in questo caso, risulta compresa tra quelle dei due componenti puri e, in generale, si nota che l'aggiunta di metano determina un innalzamento della pressione di equilibrio rispetto a quella della CO₂.

I dati sperimentali sulla composizione delle fasi in equilibrio reperiti in letteratura risultano affetti da significativi errori sperimentali (soprattutto per la composizione della fase idrato) e non del tutto coerenti tra di loro. Appare comunque evidente che la fase idrato è più ricca in CO₂ della fase gassosa in equilibrio.

La selettività degli idrati per la CO₂ rispetto al CH₄, definita come $S = (x_{CO_2}/x_{CH_4}) / (y_{CO_2}/y_{CH_4})$ con x e y che rappresentano rispettivamente le frazioni molari (su base priva di acqua) nell'idrato e nel gas, è dell'ordine di 2-5, significativamente più bassa di quella di sistemi CO₂-N₂, per i quali sono stati proposti diversi processi basati sulla formazione di idrati, e per questo motivo la separazione di miscela CO₂-CH₄ è considerata più difficile e talvolta poco promettente.

L'analisi della letteratura ha consentito anche di individuare modelli empirici (come il metodo dei coefficienti di distribuzione) o basati sulla termodinamica statistica (basati sull'approccio di van der Waals e Platteeuw, come quello implementato nel software CSMGem sviluppato dalla Colorado School of Mines), che consentono di valutare, con ragionevole affidabilità, le condizioni di stabilità degli idrati e le composizioni delle fasi in equilibrio.

Per quanto concerne la cinetica di formazione/decomposizione degli idrati, le informazioni riportate in letteratura sono frammentarie ed è difficile confrontare i risultati riportati e trarre conclusioni generali: un problema fondamentale, infatti, deriva dal fatto che la formazione e la decomposizione degli idrati possono essere realizzate in diversi modi (ad esempio per compressione della miscela e successivo raffreddamento, con formazione dell'idrato lungo la curva di equilibrio, oppure per compressione del gas già raffreddato, seguita dalla riduzione di pressione determinata dalla stessa formazione dell'idrato), ottenendo cinetiche diverse.

Nella formazione degli idrati, in genere si riconosce una fase di induzione e una fase di crescita: studiando la cinetica di formazione di idrati di CO₂ e CH₄ (singoli componenti) alcuni autori hanno evidenziato un più lungo tempo di induzione per la formazione dell'idrato di CO₂, mentre i tempi caratteristici della seconda fase non sembrano significativamente diversi. Molto limitati sono i dati sulla cinetica di formazione degli idrati misti e sull'andamento nel tempo della composizione della fase gassosa e dell'idrato.

Infine, per quanto concerne la cinetica di decomposizione degli idrati misti, l'aspetto più interessante da considerare per un'eventuale separazione CO₂/CH₄ è la self-preservation degli idrati del metano: si è evidenziato, infatti, che gli idrati del metano possono rimanere stabili abbastanza a lungo (anche alcune settimane) in

condizioni al di fuori del range di stabilità termodinamica (per esempio a pressione atmosferica nell'intervallo di temperatura tra 242 e 271 K).

Non ci sono invece evidenze chiare di self-preservation degli idrati della CO₂, nè sono state reperite informazioni su eventuali fenomeni di self-preservation per idrati misti di CO₂ e CH₄.

Lo studio bibliografico effettuato ha evidenziato come un processo di upgrading basato sulla formazione di idrati sia interessante, ma i dati disponibili sono ancora troppo limitati per un'analisi tecnica di fattibilità. In particolare, risultano carenti i dati sulla cinetica di formazione di idrati a partire da miscele CO₂-CH₄ o sulla cinetica di decomposizione di idrati misti e non è possibile fare valutazioni su processi basati su una selettività cinetica.

In ogni caso, anche in attesa di ulteriori dati derivanti dall'attività sperimentale svolta da altri partner, è stato analizzato un possibile processo a stadi di equilibrio che sfrutti la selettività termodinamica degli idrati.

Concettualmente, il nucleo centrale del processo ipotizzato è costituito dalla serie stadi di equilibrio in cui una fase slurry (idrato e acqua liquida) viene messo a contatto con il gas costituito da CO₂ e CH₄. In queste condizioni una parte della CO₂ del gas "sposta" una parte del metano presente nell'idrato, in modo tale che il gas si arricchisce in metano e l'idrato si arricchisce in CO₂.

Il biogas proveniente dal digestore, dopo gli opportuni trattamenti, viene compresso e raffreddato fino alle condizioni di incipiente formazione di idrato e alimentato in un opportuno stadio intermedio. Lo slurry, ottenuto dall'ultimo stadio viene inviato ad un "flash drum" in cui viene fornito calore per decomporre l'idrato e liberare il gas, con un basso contenuto di metano residuo, che viene in parte reintrodotta all'ultimo stadio della serie e in parte estratto come off-gas del processo. Nel flash drum si ottiene anche una corrente di acqua, derivante in parte dalla decomposizione dell'idrato e in parte dall'acqua liquida proveniente dall'ultimo stadio che, dopo essere stata raffreddata, viene rinviata al primo stadio e riutilizzata per formare l'idrato. Dallo stadio di testa si estrae la corrente di gas ricca di metano.

Si può considerare che i diversi stadi operino a pressione costante e, di conseguenza, ogni stadio lavora a temperatura differente, con temperature più basse nello stadio di testa e più alte in fondo. Per il funzionamento della colonna è quindi necessario fornire il calore al flash drum per la decomposizione dell'idrato ricco in CO₂ e sottrarre calore nello stadio di testa per la formazione dell'idrato dal gas ricco di metano.

L'analisi, condotta nell'ottica di una valutazione concettuale della complessità e delle prestazioni di un possibile processo più che di un'analisi di fattibilità tecnica, ha mostrato che, alimentando biogas al 50% di CH₄, è possibile ottenere biometano da immettere nella rete gas (contenuto di CH₄ > 97%) e un off-gas al 10% di CH₄, che può essere bruciato "in loco" recuperando energia. La separazione può essere condotta a una pressione intorno alle 27 atm e a temperature variabili, ma di poco superiori a 273 K.

Poiché la selettività termodinamica non è molto elevata, l'upgrading richiede un impianto abbastanza complesso, costituito concettualmente da 15 stadi di equilibrio. I consumi di energia, riportati in Tabella 31, sono quelli connessi alla compressione del biogas, fino alla pressione di esercizio, il riscaldamento per la decomposizione degli idrati per liberare l'off-gas e recuperare l'acqua di formazione dell'idrato e in fase liquida e, il raffreddamento per formare gli idrati.

Tabella 31. Consumi di energia di un impianto per l'upgrading di 530 Nm³/h di biogas al 50% di CH₄

	Compressore	Raffreddamento		Decomposizione idrato	Formazione idrato
		biogas	acqua		
Potenza richiesta, kW	95,7	0,43	12,8	47,7	47,7
Consumo energetico, kJ/kg CH ₄	1470,1	6,61	196,3	737,7	737,7

Se a prima vista i consumi risultano elevati, va però notato che l'energia per la decomposizione dell'idrato non può essere considerata un costo, perché si tratta di calore da fornire a bassa temperatura (≈ 5 °C) che può essere facilmente recuperato da correnti dell'impianto di biogas (per esempio dai fanghi caldi del digestore).

Inoltre, il processo di upgrading fornisce biometano ad alta pressione (27 bar), il che costituisce un vantaggio rispetto ad altri processi nel caso in cui il biometano debba essere stoccato in bombole ad alta pressione per poi alimentare motori per autotrazione, o se si deve immettere il biometano in reti gas ad alta pressione. Anche l'off-gas, ricco in CO₂, è reso a pressione elevata, ed è quindi possibile ipotizzare un recupero di energia anche dall'espansione di quest'ultimo.

Sarebbe poi da valutare l'ipotesi di un processo misto, in cui un parziale upgrading del biogas ottenuto mediante la formazione di idrati (con un impianto meno complesso, con un minor numero di stadi) è completato con un processo a membrane o di assorbimento, fino alle specifiche richieste per l'immissione in rete.

Il processo di upgrading mediante formazione di idrati appare, quindi, interessante se ottimizzato con i vari recuperi energetici possibili ed integrato con un sistema CHP (combined heat and power) o CCHP (combined cooling, heat and power). Peraltro, una sperimentazione finalizzata ad una migliore individuazione delle condizioni di equilibrio, alla valutazione della cinetica di formazione/decomposizione degli idrati ottenuti dal biogas e alla quantificazione dei risultati che si potrebbero ottenere, in termini di riduzione della pressione di esercizio o di aumento della selettività, con l'aggiunta di promotori/inibitori, potrebbe fornire i dati necessari per una migliore definizione e ottimizzazione del processo.

Parallelamente ai processi di upgrading basati sulla formazione di idrati, è stato analizzato un processo di upgrading del biogas mediante assorbimento della CO₂ con ammine in ambiente non acquoso. E' noto, infatti, che i limiti principali dei processi amminici convenzionali derivano dalla limitata tolleranza alla presenza di altri gas acidi, che possono legarsi irreversibilmente con le ammine, e dalla facilità di ossidazione delle ammine durante la rigenerazione, con la conseguente necessità di un elevato make-up di ammina. Inoltre, la concentrazione delle ammine in soluzione acquosa è necessariamente limitata al 30% in peso a causa della loro corrosività e, di conseguenza, la capacità assorbente massima della soluzione è generalmente del 10% in peso di CO₂.

Infine, si deve ricordare come la rigenerazione delle ammine debba essere condotta a temperatura elevata, con un consumo energetico rilevante (0,67 kWh/m³).

Da un punto di vista economico/energetico, quindi, le alternative attualmente allo studio riguardano sistemi di assorbimento della CO₂ che assicurino una riduzione dei consumi energetici e un aumento della capacità assorbente. In tale ambito le principali strategie comportano la sostituzione dell'acqua con alcoli o con solventi in cui la CO₂ risulti maggiormente solubile, mantenendo il medesimo elemento assorbente (alcanolamina), o in alternativa la realizzazione di un sistema assorbente totalmente innovativo.

La sostituzione dell'acqua con un alcol appare certamente la soluzione di più facile applicazione. Allo stato attuale test sono stati condotti utilizzando metanolo, che pur determinando una leggera riduzione della capacità di assorbimento, assicura una notevole riduzione dei consumi energetici in fase di rigenerazione. Nell'ambito dello stesso programma di ricerca, è stato individuato il 2-ammino-2-metil-propanolo (AMP) come particolarmente efficace per l'assorbimento della CO₂. Nella Tabella 32 sono confrontate le prestazioni di un processo convenzionale con soluzione acquosa di MEA con quelle di processi con MEA in metanolo o con AMP in alcol. Sono evidenti i vantaggi presentati dei solventi non acquosi in termini di capacità di assorbimento e consumi energetici.

Tabella 32. Confronto tra processo MEA/MeOH e altri processi per la rimozione della CO₂

Processo	T _{abs} (K)	T _{des} (K)	Consumo di energia (GJ/t)	Capacità di assorbimento (mol/mol)	Efficienza di assorbimento (%)	Efficienza di desorbimento (%)
MEA/MeOH	313	333 - 363	2,2 - 2,8	0,4	92,5	90 - 98
AMP/alcool	293-313	353 - 363	-	0,87 - 0,92	80 - 95	-
MEA/H ₂ O	303-313	381 - 398	3,0 - 4,3	0,39 - 0,55	≈ 90	> 90

Ulteriori miglioramenti possono essere ottenuti con la sostituzione dell'acqua con liquidi ionici a base imidazolica. Soluzioni di MEA/DEA in liquidi ionici basati sull'imidazolo assicurano, infatti, un forte incremento della capacità assorbente, fino a 100 volte quella mostrata dalle soluzioni acquose, anche alle più basse pressioni parziali. Gli attuali limiti di tali sistemi sono determinati dal costo del liquido ionico stesso e dall'alta viscosità di molti dei liquidi ionici allo studio.

Tra i sistemi assorbenti totalmente innovativi potenzialmente interessanti appaiono i Binding Organic Liquids (BOL). I BOL sono miscele di alcoli e basi organiche (ammidine o guanidine) in grado di reagire chimicamente con la CO₂ e dar luogo ad alchilcarbonati. L'alcool è utilizzato come solvente per ridurre la viscosità del sistema. Nelle formulazioni più recenti l'alcool è direttamente inserito nella molecola dando luogo a sistemi basati su alcanolguanidine e alcanolammidine. La capacità assorbente di queste ultime formulazioni è circa doppia (19%p) rispetto ai sistemi tradizionali acquosi.

Pur essendo ancora in fase di studio, da dati di letteratura si può evincere che tutti questi sistemi potenzialmente consentirebbero, a parità di capacità assorbente, una riduzione delle dimensioni delle apparecchiature fino al 70%, assicurando al contempo un risparmio energetico superiore al 50% rispetto alle tecnologie attualmente in uso.

Upgrading del biogas a biometano con separazione di CO₂ mediante assorbimento con soluzioni amminiche in solvente organico

L'attività sperimentale, svolta presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Firenze [rapporto RdS/2013/169] aveva come oggetto la cattura reversibile di CO₂ con soluzioni non acquose di ammine. In questo protocollo sono stati riformulati assorbenti chimici atti a separare efficacemente due componenti acidi, CO₂ e H₂S, contenuti in una miscela gassosa, l'uno dall'altro ed ambedue da un altro componente gassoso "neutro". Questi liquidi sono basati sull'ammina 2-ammino-2-metil-1-propanolo pura o miscelata ad altre ammine, e su alcoli alto bollenti.

La sostituzione dell'acqua con un solvente organico ha la potenzialità di ridurre i principali svantaggi delle tradizionali soluzioni acquose delle ammine, in particolare la loro degradazione termica, la corrosione degli impianti e l'energia richiesta nello stadio di rigenerazione, pur mantenendone l'elevata efficienza. L'obiettivo della ricerca sperimentale è stato quindi quello di riformulare liquidi assorbenti per massimizzarne i vantaggi riducendone gli svantaggi.

La prima parte dello studio consiste in un'indagine preliminare per caratterizzare e quantificare la fissazione di CO₂ da parte dei diversi liquidi assorbenti. Mediante l'analisi spettroscopica NMR di ¹³C delle soluzioni carbonatate, è stato trovato che CO₂ è catturato in soluzione come carbammato dell'ammina e carbonato dell'alcol in quantità relative differenti a seconda del rapporto CO₂/ammina e della stabilità sia del carbonato dell'alcol che del carbammato dell'ammina. In queste prove sono state usate miscele gassose di aria contenenti CO₂ al 15 e 40% (v/v) ed anche 50 ppm di H₂S.

Questi esperimenti di assorbimento-desorbimento di CO₂ sono stati eseguiti in processi batch con l'obiettivo di individuare le formulazioni più efficienti da impiegare nella seconda parte dell'indagine sperimentale basata su processi continui a ciclo chiuso dove la soluzione carbonatata e quella rigenerata sono fatte circolare continuamente fra l'assorbitore e il desorbitore. L'efficienza di assorbimento di CO₂ nei processi ciclici è stata misurata in funzione di diversi parametri operativi quali la temperatura di desorbimento (90-95 °C), il flusso del liquido (0,33-0,95 dm³/h), la quantità del liquido assorbente (0,400-0,450 dm³) e la composizione della miscela gassosa (CO₂, 15-40% v).

Nelle migliori condizioni operative, l'efficienza di assorbimento di CO₂ è stata almeno del 95%. Infine, la separazione finale di H₂S da CO₂ è stata eseguita per via ossidativa con perossido di idrogeno oppure mediante una reazione acido-base con un'ammina terziaria, trasformando H₂S in un prodotto solido (zolfo elementare o CaSO₃). L'ammina terziaria è rigenerata per il suo riuso.

Con ambedue i metodi la cattura di H₂S è stata completa e quindi CO₂ si libera allo stato puro alla fine del processo.

Cattura reversibile di CO₂ in processi batch

Il liquido ideale per l'assorbimento chimico di CO₂ dovrebbe avere queste caratteristiche principali:

- elevata capacità di cattura di CO₂ (rapporto CO₂/base vicino a 1);
- elevata velocità di reazione combinata con una bassa entalpia di reazione (in valore assoluto; minore energia necessaria alla rigenerazione);
- bassa volatilità;
- stabilità termica e ossidativa.

I liquidi più studiati sono soluzioni acquose di ammine, di carbonati alcalini e di ammoniaca, ma nessuna di queste soluzioni ha tutte le caratteristiche auspicabili.

Le ammine hanno una capacità di assorbimento intorno a 0,5, tendenza a degradarsi col tempo (MEA, il 50% per anno) e richiedono molta energia nella rigenerazione, mentre i carbonati alcalini sono stabili, hanno bassa energia di reazione e una capacità assorbente teorica uguale a 1, ma hanno scarsa efficienza a causa della velocità di reazione troppo bassa.

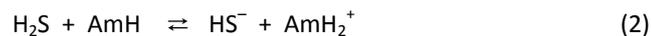
L'ammoniaca in acqua sarebbe l'assorbente più vicino a quello ideale, ma soffre dello svantaggio fondamentale di essere un gas e quindi richiede processi aggiuntivi per impedirne la perdita sia nel processo di assorbimento sia di desorbimento, dove si libera insieme a CO₂ da cui deve essere necessariamente separata.

Nell'ambito di precedenti attività di ricerca sull'argomento, sono stati formulati e sperimentati nuovi liquidi assorbenti con l'obiettivo di sfruttare i vantaggi delle soluzioni acquose delle ammine, ma riducendone gli svantaggi. Siccome una parte considerevole dell'energia del processo di rigenerazione delle ammine in acqua è consumata per effettuare l'evaporazione dell'acqua (entalpia di evaporazione elevata, 2,44 kJ g⁻¹) ed il suo riscaldamento dalla temperatura di assorbimento (30-40 °C) a quella di desorbimento (120-140 °C), si è sostituita

l'acqua con solventi organici, che hanno calore specifico ed entalpia di evaporazione minore dell'acqua (in media, la metà).

Sono state scelte ammine che reagiscono velocemente con CO₂ in ambiente non acquoso, ma con minore entalpia di reazione (in valore assoluto) e che quindi richiedono temperature di rigenerazione più basse (90-95 °C a pressione ambiente) rispetto a quelle delle soluzioni acquose (120-140 °C sotto pressione). Inoltre, le temperature di esercizio più basse rallentano la decomposizione delle ammine e la corrosione dei reattori. Infine, l'uso di solventi organici non richiede modifiche importanti agli impianti che funzionano con le soluzioni acquose.

H₂S e CO₂ sono ambedue acidi deboli (pKa ≈ 7) e dunque la loro separazione non è possibile mediante un unico processo di assorbimento-desorbimento con una base generica. Infatti, facendo assorbire la miscela gassosa contenente CO₂, H₂S e anche un gas non acido (ad es. H₂ o CH₄) in una soluzione non acquosa di un'ammina generica (AmH), avvengono le due reazioni:



Il processo termico di desorbimento-rigenerazione inverso delle reazioni (1) e (2) libera la miscela di CO₂ e H₂S di partenza.

Con questo processo si possono evidentemente separare i due componenti acidi, H₂S e CO₂, dai componenti non reattivi (dal punto di vista acido-base), ma CO₂ contenente H₂S non può essere immesso nell'atmosfera né sequestrato in cavità sotterranee a causa dell'estrema tossicità di quest'ultimo. Per questi motivi è necessario catturare selettivamente H₂S, separandolo da CO₂, e trasformarlo in un prodotto non nocivo e facilmente separabile dal mezzo assorbente.

Gli esperimenti preliminari di cattura reversibile di CO₂ sono stati condotti con le seguenti ammine:

- 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP); (CH₃)₂-C(NH₂)-CH₂-OH
- 2-amminopropanolo (AM2P); CH₃-CH(NH₂)-CH₂-OH
- 2-amminoetanolo (MEA); NH₂-CH₂-CH₂-OH
- 2-metilamminoetanolo (MMEA); CH₃-NH-CH₂-CH₂-OH
- 2-(*t*-butilammino)etanolo (TBMEA); (CH₃)₃C-NH-CH₂-CH₂-OH
- 2-(*i*-propilammino)etanolo (IPMEA); (CH₃)₂CH-NH-CH₂-CH₂-OH
- 2,2'-dietanolimina (DEA); HN-(CH₂-CH₂-OH)₂
- N-metil-2,2'-dietanolimina (MDEA); CH₃-N-(CH₂-CH₂-OH)₂
- 2-(2-amminoetossi)etanolo (DGA); NH₂-CH₂-CH₂-O-CH₂-CH₂-OH.

La scelta delle ammine si è basata su precedenti indagini in soluzione acquosa, che hanno indicato elevata capacità ed efficienza di assorbimento e/o di desorbimento di CO₂.

I solventi impiegati sono una miscela di glicol etilenico (HO-CH₂-CH₂-OH, EG) e propanolo (CH₃-CH₂-CH₂-OH, PrOH) in rapporto 1/1 in volume, oppure il singolo etere monometilico del glicol dietilenico (CH₃-O-CH₂-CH₂-O-CH₂-CH₂-OH, DEGMME).

La scelta dei solventi è stata fatta in base ai requisiti seguenti:

- basso costo industriale;
- bassa volatilità (da soli o in miscela) alla massima temperatura di esercizio (90 - 95 °C);
- viscosità non troppo elevata.

Non è possibile usare il glicol etilenico, che avrebbe le caratteristiche più favorevoli, da solo perché la sua elevata viscosità riduce considerevolmente l'assorbimento di CO₂.

Le condizioni operative dei processi di assorbimento e, separatamente, di desorbimento adottate sono le seguenti:

- miscele di CO₂ al 15% e al 40% (rapporto in volume) con aria;
- volume della miscela gassosa 2,20 dm³ a 25 °C, corrispondente a 0,0135 moli di CO₂ al 15% e a 0,0363 moli di CO₂ al 40%;
- concentrazione delle ammine 3,0 mol/dm⁻³, complessivamente; miscele di ammine in rapporto molare 1/1;
- volume delle soluzioni 40 x 10⁻³ dm³, corrispondente a 0,120 moli di ammina;
- temperature di assorbimento/desorbimento, 25 / 90 °C.

Il processo viene realizzato in un pallone di vetro (volume nominale = 2 dm³) contenente il liquido assorbente e la miscela gassosa a pressione ambiente, e la variazione di pressione è misurata con un manometro digitale collegato al pallone. L'esperimento termina quando la pressione residua nel pallone rimane costante nel tempo (20-45 min). Dalla progressiva diminuzione di pressione si calcola la quantità di CO₂ assorbita in funzione del tempo. Il desorbimento di CO₂ e la rigenerazione dell'ammina si ottengono riscaldando il pallone a 90 °C con bagno ad olio: il gas liberato viene riportato a temperatura ambiente con una serpentina raffreddata con acqua e misurato con una buretta riempita con acqua satura di CO₂ e munita di bolla equilibratrice. Dal volume di CO₂ raccolto su acqua se ne calcola la quantità desorbita. La velocità di desorbimento diminuisce rapidamente col tempo e l'equilibrio è raggiunto in 1 ora.

In un esperimento condotto con AMP in EG/PrOH, la soluzione è stata progressivamente saturata con aggiunte successive (in totale 7) di 2,2 dm³ di CO₂ al 15% (0,0135 moli). Le prove sono state eseguite nel modo seguente: dopo che il primo assorbimento ha raggiunto l'equilibrio, il residuo gassoso viene rapidamente aspirato dal pallone e sostituito con una nuova miscela di CO₂ al 15% v (l'operazione è ripetuta due volte). Si fa nuovamente assorbire CO₂ fino a pressione costante, 30 min sono sufficienti per arrivare al nuovo equilibrio. L'assorbimento diminuisce fino a cessare del tutto dopo la settima aggiunta. I risultati sono riportati in Tabella 33.

Tabella 33. Assorbimenti additivi di CO₂ al 15% a 25 °C e 1,0 bar nella soluzione di AMP in EG/PrOH

Step	CO ₂ assorbito (moli)	% CO ₂ assorbito ^(a)	Loading (n/n) ^(b)
1	0,0118	87,4	0,098
2	0,0102	76,6	0,085
3	0,0081	60,0	0,068
4	0,0072	53,3	0,060
5	0,0061	45,2	0,051
6	0,0040	29,6	0,033
7	0,0014	10,3	0,012
Totale	0,0488		0,407

^(a) Percentuale di CO₂ assorbito rispetto a quello contenuto nel pallone (0,0135 moli)

^(b) Rapporto molare fra CO₂ assorbito in ciascuna aggiunta e l'ammina iniziale (0,120 moli)

Le prove separate di assorbimento e desorbimento hanno lo scopo di effettuare una prima selezione delle ammine prevedibilmente più efficienti in un ciclo continuo. Le ammine primarie MEA, DGA, AM2P e secondarie DEA e MMEA in DEGMME hanno un'efficienza di assorbimento molta alta (≥ 95%, calcolata come la percentuale di CO₂ assorbito rispetto a quello immesso nella soluzione). Al contrario, tutte hanno desorbimento basso (15-30%, calcolato come la percentuale di CO₂ riemesso rispetto a quello catturato) rispetto alle altre ammine secondarie e terziarie IPMEA, TBMEA, MDEA e all'ammina primaria "ingombrata" AMP. L'efficienza di desorbimento a temperatura relativamente bassa è essenziale in un processo continuo a ciclo chiuso per cui MEA, DGA, AM2P, DEA e MMEA sembrano essere meno adatte all'utilizzo in cicli continui. Pertanto, i liquidi assorbenti utilizzati nel presente lavoro si basano su 2-amino-2-metil-1-propanolo (AMP), sia per la sua stabilità termica, sia per la bassa entalpia di reazione (in valore assoluto) con CO₂.

La Figura 117 riassume l'efficienza di assorbimento, in funzione del tempo, di alcune ammine singole e delle loro miscele 1/1 (in moli) in soluzione di EG/PrOH e di DEGMME.

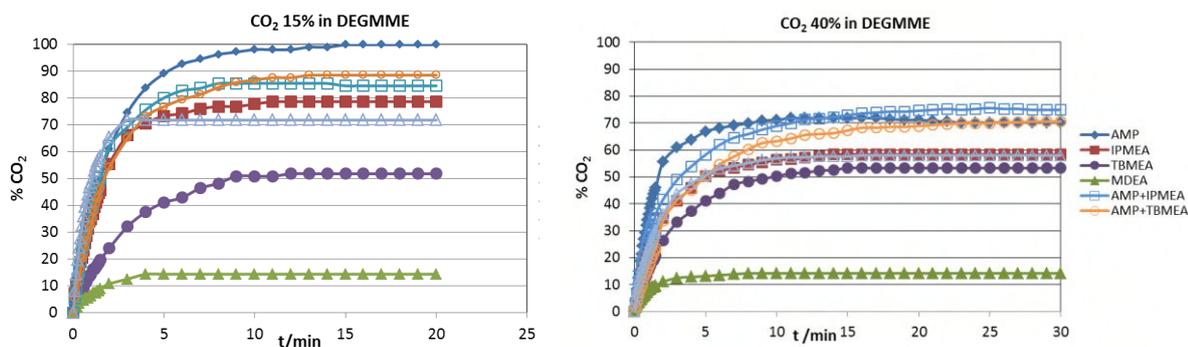


Figura 117. Efficienza di assorbimento di CO₂ (15 e 40%) con le diverse ammine in funzione del tempo in DEGMME

Con la maggior parte delle ammine, l'assorbimento raggiunge l'equilibrio in 20 minuti: l'equilibrio dipende anche dal tipo di solvente e della percentuale di CO₂, cioè delle quantità di CO₂ assorbito.

In termini generali, l'efficienza di assorbimento decresce nell'ordine seguente:

- AMP > IPMEA > TBMEA > MDEA
- AMP/IPMEA ≥ AMP/TBMEA > AMP/MDEA
- mix ammine > ammine singole (con l'eccezione di AMP)
- EG/PrOH > DEGMME
- CO₂ 15% > CO₂ 40%.

Sebbene non sia possibile generalizzare i risultati delle velocità (iniziali) di assorbimento, alcune conclusioni possono essere tratte: fra le ammine singole, AMP e IPMEA sono i sorbenti più veloci, indipendentemente dal solvente e dalla percentuale di CO₂, mentre fra le ammine miste AMP/TBMEA e AMP/MDEA sono più veloci delle rispettive ammine singole TBMEA e MDEA, ma non di AMP. Infine, l'assorbimento iniziale in DEGMME è, nella maggior parte dei casi, più veloce che in EG-PrOH, ma quantitativamente minore all'equilibrio.

L'efficienza di assorbimento è compresa fra il minimo del 13% per MDEA in DEGMME e CO₂ 40% ed il massimo del 100% per diverse ammine nella miscela EG/PrOH e CO₂ 15%. La maggiore efficienza con CO₂ al 15% rispetto a CO₂ al 40% è facilmente spiegabile con il maggior rapporto ammina/CO₂ nel primo caso. A parità delle altre condizioni sperimentali, la miscela glicol etilenico-propanolo ha un significativo vantaggio rispetto all'etere metilico del glicol dietilenico, in virtù di una maggiore reattività nei confronti di CO₂.

Particolarmente evidente è l'esempio di MDEA, con l'efficienza che aumenta dal 16% in DEGMME al 48% in EG-PrOH (miscela CO₂, 15%). MDEA, in particolare, ha la minore efficienza di assorbimento poiché è un'ammina terziaria e quindi reagisce con CO₂ soltanto in ambiente acquoso. Anche DEGMME ha scarsa tendenza a reagire con CO₂ a differenza del glicol e del propanolo.

Considerando le diverse ammine singole, l'efficienza di assorbimento diminuisce mano a mano che aumenta l'ingombro sterico adiacente, oppure sulla funzione amminica e quindi nell'ordine AMP > IPMEA > TBMEA. Infine, la miscela di due ammine è più efficiente di ciascuna singola ammina, a parità di tutte le altre condizioni sperimentali, ma meno efficiente della singola AMP. In particolare, l'efficienza di AMP/MDEA (75% in DEGMME) è molto maggiore di quella della singola MDEA (16% in DEGMME) con CO₂ al 15%.

L'efficienza di desorbimento, calcolata come la percentuale di CO₂ desorbito rispetto a quello catturato, aumenta all'aumentare della quantità di CO₂ assorbito, cioè dal 15 al 40% di CO₂. La dipendenza dell'efficienza di desorbimento dal tipo di sorbente (ammina singola, miscela di ammine, solvente) non sembra essere razionalizzabile in modo evidente.

Assorbimento e desorbimento di CO₂ in un sistema a ciclo continuo con separazione di H₂S

L'apparato sperimentale (Figura 118) di assorbimento-desorbimento di CO₂ a ciclo chiuso è formato da due unità, una assorbente e l'altra desorbente, connesse fra loro con una pompa peristaltica a due teste per il ricircolo del liquido. L'assorbitore e il desorbitore sono due cilindri in vetro a parete doppia (diametro interno 56 mm e altezza 400 mm) riempiti con anelli di vetro (5 mm di diametro).

Due termostati mantengono l'assorbitore e il desorbitore alle temperature prefissate facendo circolare glicol etilenico nell'incamiciatura delle due colonne. L'assorbitore funziona in controcorrente: il liquido assorbente rigenerato percola continuamente dall'alto dell'assorbitore mentre la miscela dei gas è introdotta nella parte inferiore della colonna.

Il liquido assorbente carbonatato esce dal fondo della colonna e viene introdotto nella sommità del desorbitore. Il gas in uscita dall'assorbitore, dopo essere stato appropriatamente seccato, è analizzato con un gas cromatografo. Sulla base dei risultati ottenuti nelle prove batch, le prove in continuo sono state limitate a quelle miscele che fanno prevedere i risultati migliori: AMP, AMP/IPMEA e AMP/TBMEA in EG/PrOH 1/1 (v/v).

La carbonatazione delle medesime ammine nell'etere DEGMME provoca la precipitazione dei carbammati corrispondenti allo stato solido nell'assorbitore e quindi preclude la loro rigenerazione nel desorbitore. La formazione di carbammati solidi può presentare alcuni vantaggi rispetto ai sistemi omogenei liquidi, poiché i

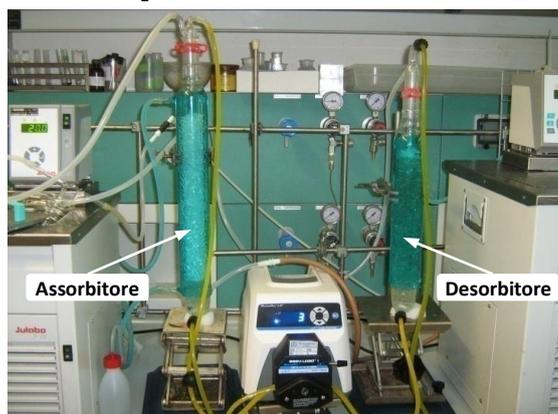


Figura 118. Sistema di assorbimento e desorbimento di CO₂

carbammati solidi si decompongono a temperature più basse delle stesse specie in soluzione e, separata la fase liquida, si evita il calore sensibile del liquido. Tuttavia, la formazione di una fase solida richiede il ridisegno del sistema di assorbimento-desorbimento.

L'efficienza di assorbimento di CO₂ con un'ammina, singola o in miscela, dipende da una varietà di parametri, in particolare dalle temperature di assorbimento e di desorbimento, dalla concentrazione e dalla quantità delle ammine, dai flussi della miscela gassosa e del liquido, dalle percentuali di CO₂ nella miscela gassosa. Per limitare il numero delle prove sperimentali ad un numero ragionevole, i seguenti parametri sperimentali sono stati tenuti fissi in tutte le prove:

- concentrazione complessiva delle ammine (singola o in miscela molare 1/1), 3,0 mol dm⁻³;
- temperatura di assorbimento, 20 °C;
- flusso del gas, 12,2 dm³/h.

Conseguentemente, l'efficienza dell'assorbimento è stata misurata in funzione di:

- temperatura di desorbimento, 90 e 95 °C;
- flusso del liquido, pari a 0,330, 0,650 e 0,950 dm³/h;
- volume del liquido, 0,400 e 0,450 dm³;
- composizione della miscela gassosa, 15 e 40% di CO₂ (v/v);
- presenza di H₂S, 50 ppm (v/v) nella miscela gassosa.

Un ciclo completo di assorbimento-rigenerazione dura 24-36 ore e termina quando si raggiunge uno stato stazionario fra la cattura di CO₂ e la rigenerazione dell'ammina. I risultati delle prove cicliche sono riportati nella Tabella 34.

Tabella 34. Efficienza di assorbimento di CO₂ nei sistemi a ciclo chiuso in funzione dei parametri operativi

Ammine	Flusso liquido (L/h)	T _{assorb} (°C)	T _{desorb} (°C)	Efficienza (%)
CO₂ 40% v				
AMP	0,33	20	95	95,0
	0,65	20	90	93,5 ^(a)
	0,65	20	95	96,5 ^(a)
	0,95	20	95	92,0 ^(a)
AMP + IPMEA	0,33	20	90	89,1
	0,65	20	90	92,1
	0,65	20	95	94,0
	0,65	20	95	94,7 ^(a)
	0,95	20	90	89,4
AMP + TBMEA	0,65	20	95	95,7 ^(a)
CO₂ 15% v				
AMP	0,33	20	90	91,3
	0,33	20	95	93,3
	0,33	20	95	95,4 ^(a)
AMP + IPMEA	0,33	20	90	88,9
	0,33	20	95	91,3
	0,33	20	95	89,4 ^(a)
AMP + TBMEA	0,65	20	95	86,7
	0,33	20	95	91,0 ^(a)
	0,65	20	95	93,3 ^(a)

^(a) Volume del liquido 0,450 dm³; in tutti gli altri casi è 0,400 dm³

I dati riportati nella Tabella 34 indicano che l'assorbimento di CO₂ al 40% v è più efficiente di quello al 15%v. A parità di percentuale di CO₂ nella miscela, l'efficienza aumenta con la temperatura di desorbimento e con il volume del liquido contenuto, complessivamente, nei due reattori (tranne AMP-IPMEA, ma probabilmente si rientra negli errori sperimentali).

Il flusso del liquido agisce in modo differente in funzione della percentuale di CO₂, 15 o 40%, nella miscela gassosa. Il flusso più basso, a 0,330 dm³/h, fa aumentare il tempo di residenza del liquido sia nell'assorbitore che nel desorbitore e quindi ne massimizza l'efficienza. Il flusso più alto, a 0,950 dm³/h, trasferisce una maggiore quantità di liquido rigenerato dal desorbitore all'assorbitore e viceversa: il miglior compromesso fra i due effetti è il flusso del liquido che trasferisce la maggior quantità di ammina rigenerata dal desorbitore all'assorbitore nell'unità di tempo. Ciò si verifica con 0,330 dm³/h per CO₂ al 15% (eccetto AMP-TBMEA) e con 0,650 dm³/h per CO₂ al 40%.

In conclusione, l'efficienza di assorbimento di CO₂ è risultata pari al 91-96%, impiegando i parametri operativi migliori. Prove cicliche effettuate in precedenza hanno mostrato che ulteriori miglioramenti (2-3%) sono possibili

con l'impiego di due colonne di desorbimento, a parità di tutti gli altri parametri, come pure aumentando il volume del liquido fino a 0,600 dm³.

La stabilità termica delle ammine impiegate nei cicli è stata verificata riscaldando le loro soluzioni in EG/PrOH a 100 °C per la durata di 30 giorni. L'analisi NMR di ¹³C delle soluzioni finali non mostra segnali in più rispetto a quelli delle ammine e dei solventi delle prove in bianco: le diverse ammine impiegate nei cicli hanno dunque ottima stabilità termica.

La separazione di CO₂ da H₂S e la trasformazione di quest'ultimo in un prodotto non nocivo è stata effettuata successivamente al desorbimento di CO₂ e di H₂S facendo passare la miscela gassosa, attraverso un setto poroso, in una colonna di vetro contenente un liquido che reagisca con H₂S ma non con CO₂.

A questo scopo sono state usate, in alternativa, una soluzione acquosa di H₂O₂ e una soluzione di un'ammina terziaria in un solvente organico. La reazione di H₂S con H₂O₂ è:

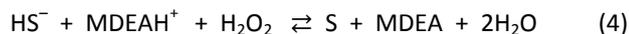


In questo modo lo zolfo elementare si separa dalla soluzione e la CO₂ passa inalterata.

Un metodo alternativo è la cattura di H₂S con un'ammina terziaria in un solvente organico secondo la reazione (2): CO₂ non reagisce né con l'ammina terziaria, né col solvente purché non contenga la funzione alcolica (-OH) oppure l'alcol abbia una catena alifatica con più quattro atomi di carbonio.

A questo scopo è stato usato l'etere dietilico del glicol dietilenico [C₂H₅-O-(CH₂)₂-O-(CH₂)₂-O-C₂H₅, DEGDEE] e DEGMME, mentre l'ammina terziaria è MDEA, DMMEA, TEA (trietilammina), EDIPA (etil-diisopropilammina). La solubilità, presumibilmente per assorbimento fisico, di CO₂ in questi solventi è modesta: in ogni modo, raggiunta la massima solubilità, non se ne scioglie ulteriormente.

La rigenerazione dell'ammina terziaria per il suo riutilizzo avviene per via ossidativa con acqua ossigenata secondo la reazione:

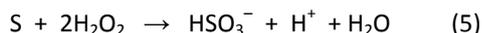


Con ambedue i metodi, l'assorbimento di H₂S è stato totale. Questo risultato è stato verificato mettendo a valle della colonna di assorbimento di H₂S una trappola a CuCl₂ sciolto in acqua in cui si fa gorgogliare il gas in uscita: tracce anche minime di H₂S che escono dalla colonna di assorbimento farebbero precipitare CuS, effetto mai verificato.

Negli esperimenti precedenti di cattura di H₂S (50 ppm) non è stato possibile verificare, almeno in modo evidente, la precipitazione di zolfo elementare. Infatti, dopo 24 ore di flusso della miscela gassosa contenente anche 50 ppm di H₂S, si possono formare teoricamente 22 mg di zolfo elementare che, per di più, si separerebbe in forma colloidale e quindi, al massimo, si osserva una leggera opalescenza gialla nella soluzione di H₂O₂.

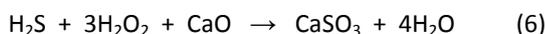
Per verificare la funzionalità del sistema anche in presenza di quantità apprezzabili del solfuro, è stato effettuato un ciclo (20-95 °C) con la soluzione formata da AMP/IPMEA-DEGMME (0,400 dm³, 3,00 moli dm⁻³) a cui sono stati aggiunti 5 g di Na₂S·9H₂O (0,021 moli) sciolti nella minima quantità di acqua e flusso di CO₂ al 15% v. Preventivamente è stato verificato che H₂S non fuoriesce dalla colonna di assorbimento di CO₂ a 20 °C mentre si libera da quella di desorbimento a 95 °C.

Dopo questa verifica, è stata messa in serie alla colonna di desorbimento quella di assorbimento di H₂S contenente la soluzione acquosa di H₂O₂: usando H₂O₂ 0,10 mol dm⁻³ con rapporto molare H₂O₂/Na₂S 1/1 si forma inizialmente zolfo elementare, che lentamente scompare dando una soluzione limpida, secondo la reazione:



Con H₂O₂ 0,65 mol dm⁻³ e rapporto 3/1 lo zolfo elementare si ossida pressoché istantaneamente dando una soluzione limpida e incolore.

HSO₃⁻ è stato separato dalla soluzione precipitandolo con la quantità stechiometrica di CaO. La reazione complessiva è:



Anche con questa quantità di solfuro, molto maggiore di 50 ppm, l'assorbimento di H₂S con H₂O₂ è stato totale. Questo sistema non è rigenerativo e richiede la reintegrazione di H₂O₂ nella soluzione assorbente e l'aggiunta di CaO in funzione delle quantità di H₂S da assorbire. L'uso dell'ossido al posto di un qualsiasi sale di calcio è dettato dalla necessità di neutralizzare l'acidità che si forma progressivamente nell'ossidazione (5), che farebbe diminuire la solubilità di H₂S e porterebbe alla formazione anche di SO₂ che si ritroverebbe insieme a CO₂.

La cattura di H₂S con le ammine terziarie in solvente organico è efficiente come quella con H₂O₂ in acqua, ma la rigenerazione delle ammine con la soluzione acquosa di H₂O₂ (4) ha posto alcuni problemi pratici. In alcuni casi, infatti, l'aggiunta della soluzione acquosa di H₂O₂ determina la separazione di due fasi liquide, con l'ammina rigenerata (MDEA, DMMEA) che si ripartisce prevalentemente nella fase acquosa e in misura minore nella fase organica, e l'ammina rigenerata in acqua non serve per il riuso perché assorbe CO₂ al posto di H₂S.

Usando un'ammina terziaria non contenente gruppi idrofili e non volatile, ad esempio la trietilammina o la etil-diisopropilammina in DEGDEE, oppure MDEA nel solvente idrofilo DEGMME, il problema è stato risolto. La solubilità di CO₂ in questi solventi è del 10-15%, ma raggiunta la saturazione non si scioglie ulteriormente. La soluzione acquosa di H₂O₂ con etil-diisopropilammina in DEGDEE forma due fasi, ma l'ammina si ripartisce nel solo solvente organico: le due fasi devono essere separate e la fase organica riusata. Il sistema più efficace sembra essere MDEA o DMMEA in DEGMME perché si forma una sola fase liquida.

Considerazioni conclusive

I nuovi liquidi assorbenti non acquosi che sono stati formulati presentano l'ottima efficienza delle soluzioni acquose delle medesime ammine riducendone alcuni svantaggi. In particolare, questi assorbenti organici combinano un'efficienza del 91-96% con una temperatura di desorbimento relativamente bassa (90-95 °C) a pressione ambiente.

Questi risultati sono stati ottenuti in virtù dei prodotti derivanti dalla carbonatazione nei solventi organici, differenti e meno stabili rispetto a quelli che si ottengono nelle soluzioni acquose delle medesime ammine. L'analisi spettroscopica NMR di ¹³C ha permesso di identificare e quantificare questi prodotti: carbammati delle ammine e carbonati degli alcoli.

La ridotta temperatura di desorbimento, la minore capacità termica ed entalpia di evaporazione degli alcoli, la presumibile minore entalpia di reazione (in valore assoluto) dovuta alla minore stabilità termodinamica dei prodotti rispetto a quelli delle soluzioni acquose, presi tutti insieme hanno la potenzialità di ridurre l'energia spesa nel processo di rigenerazione delle specie carbonatate. Inoltre, la temperatura di desorbimento inferiore a quella delle soluzioni acquose, riduce la degradazione delle ammine e la corrosione dei reattori, come confermato dalle analisi NMR di ¹³C, che hanno mostrato che le ammine impiegate nei processi ciclici non subiscono alterazioni apprezzabili dopo 30 giorni di riscaldamento a 100 °C.

La separazione finale di H₂S da CO₂ avviene in modo completo, trasformando H₂S in un prodotto solido non nocivo (zolfo elementare o solfito di calcio), mediante l'impiego di reagenti, H₂O₂ e CaO, di basso costo e di larga produzione industriale.

La cattura di CO₂ in DEGMME, precipitandolo in fase solida come carbammato delle ammine, potrebbe essere presa in considerazione come valida alternativa ai processi in fase omogenea descritti in precedenza. Il vantaggio principale di questo sistema eterogeneo consiste nella rigenerazione della sola fase solida, dopo che sia stata separata dal solido, e quindi non viene sprecata energia per riscaldare il liquido alla temperatura di desorbimento (calore sensibile). Inoltre, la decomposizione dei carbammati allo stato solido di AMP e, presumibilmente, di IPMEA e TBMEA, richiede temperature relativamente basse (65-70 °C).

Tuttavia, questo processo eterogeneo richiede un diverso disegno dell'impianto poiché la fase solida deve essere continuamente separata dal liquido durante lo stadio di assorbimento, rigenerata e reintrodotta in circolo.

Sebbene i sorbenti organici a base di ammine oggetto della presente sperimentazione rappresentino un miglioramento rispetto alle loro soluzioni acquose impiegate tradizionalmente, tuttavia alcune ammine e i loro prodotti di degradazione termica possono essere sostanze potenzialmente nocive ed il loro impiego su scala industriale potrebbe porre anche problemi di impatto ambientale che fino ad ora non sono stati presi nella dovuta considerazione.

Le ammine potrebbero essere ancora vantaggiose, purché la loro rigenerazione possa essere condotta a temperature non superiori a 50-60 °C, per un decisivo risparmio energetico. Tuttavia, la ricerca futura dovrebbe indirizzarsi alla formulazione di nuovi assorbenti chimici efficienti quanto le ammine, ma senza i loro svantaggi.

Upgrading del biogas mediante formazione di gas idrati

La separazione di miscele gassose mediante formazione di gas idrati è una tecnologia emergente che promette ottime prospettive applicative. Tale tecnologia può essere applicata secondo due possibili approcci. Il primo prevede la separazione per formazione di idrato, selettiva o preferenziale, di una delle componenti della miscela, il secondo per dissociazione, selettiva o preferenziale, di uno dei componenti della miscela da un idrato misto.

Questa tecnologia può risultare vantaggiosa sotto vari aspetti, i principali dei quali sono le condizioni operative, meno drastiche di quelle necessarie per il frazionamento criogenico, e la capacità degli idrati di concentrare i gas nella loro fase solida anche di 180 volte.

Processi per separare miscele di $\text{CO}_2\text{-N}_2$ o miscele $\text{CO}_2\text{-H}_2$ mediate formazione di gas idrati sono noti e sono stati proposti come processi alternativi e vantaggiosi per la cattura della CO_2 da gas esausti (mix $\text{CO}_2\text{-N}_2$) o per la raffinazione del syngas (mix $\text{CO}_2\text{-H}_2$). L'azoto e l'idrogeno mostrano infatti condizioni di formazione di idrato molto lontane da quelle necessarie per la formazione di idrati di CO_2 , per cui la cattura della CO_2 da queste miscele risulta relativamente agevole.

L'applicazione della tecnologia dei gas idrati per la purificazione del biogas può essere una promettente strategia per la produzione di biometano. Il biogas inoltre è prodotto ad una temperatura prossima a quella ambiente e si presta maggiormente ad un processo di raffinazione con gas idrati di quanto non sia per le miscele di gas esausti e syngas, che invece sono prodotti a temperature dell'ordine dei 200-400 °C. Tuttavia le condizioni termodinamiche di formazione di idrati di CO_2 e CH_4 , principali costituenti del biogas, non sono molto diverse, come nel caso delle miscele $\text{CO}_2\text{-N}_2$ e $\text{CO}_2\text{-H}_2$, per cui la separazione di questa miscela risulta più difficile.

Non sono molti i dati di letteratura concernente la formazione di idrati dalla miscela gassosa CH_4/CO_2 , anche se recentemente numerosi studi si sono concentrati sulla possibilità di estrarre CH_4 dai giacimenti di idrato naturale rimpiazzandolo con la CO_2 che forma idrati più stabili. Questa strategia permetterebbe di estrarre il metano senza destabilizzare i fondali oceanici ed inoltre stoccando una equivalente quantità di CO_2 , con un ciclo di sfruttamento del giacimento virtualmente ad emissioni zero.

Dai dati di letteratura, relativi alla termodinamica degli idrati della miscela $\text{CO}_2\text{-CH}_4$, si evince che da un punto di vista termodinamico un processo di separazione basato sugli idrati risulterebbe meno selettivo in confronto alla miscela $\text{CO}_2\text{-N}_2$ e $\text{CO}_2\text{-H}_2$. Tuttavia la formazione di idrati da miscele $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ è caratterizzata da numerose anomalie cinetiche che aprono interessanti finestre applicative per un processo di separazione basato su idrati.

Si è osservato ad esempio che la formazione di idrati di CO_2 e CH_4 procede con cinetiche nettamente diverse in funzione della pressione parziale dei due gas. E' stato inoltre dimostrato che in una miscela di $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ è il metano ad iniziare il processo di formazione di idrati, contrariamente a quanto ci si dovrebbe attendere dai dati termodinamici, essendo il metano il componente che forma idrati più instabili.

Un'ulteriore anomalia cinetica della miscela $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ è rilevabile nella fase di dissociazione dell'idrato, infatti è stato osservato come nelle prime fasi di dissociazione viene rilasciata più CO_2 che metano, e questo comportamento è anomalo in quanto la CO_2 è il gas che forma idrati più stabili e quindi quello che dovrebbe dissociare più difficilmente del CH_4 .

Molto interessante è anche il comportamento degli idrati misti di $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ rispetto al fenomeno della "Self Preservation", fenomeno per il quale gli idrati di metano risultano particolarmente stabili a pressione ambiente e temperature prossime ai -5 °C. Dati sperimentali evidenziano come tale fenomeno sembri essere molto marcato per il CH_4 e meno evidente per la CO_2 .

Un processo di purificazione del biogas mediante formazione di gas idrati risulta comunque interessante da un punto di vista economico, dato che questo metodo potrebbe essere energeticamente vantaggioso rispetto ai processi alternativi.

Lo scopo del presente lavoro, svolto presso i laboratori della Società RDPower S.r.l. [rapporti RdS/2013/181 e 264] è quello di verificare preliminarmente la fattibilità della separazione della miscela $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ mediante formazione di gas idrati analizzando gli aspetti cinetici e termodinamici del processo, nella prospettiva di arrivare ad una futura e più ampia caratterizzazione del sistema allo scopo di sviluppare un processo di upgrading del biogas basato sull'utilizzo di gas idrati.

La natura della campagna sperimentale del presente progetto di ricerca è stata di carattere esplorativo, come previsto dallo scopo del lavoro, ed ha puntato quindi ad esplorare il più ampio range sperimentale minimizzando il numero di esperimenti richiesti. Per questo approccio un disegno statistico sperimentale saturo risulterebbe inapplicabile, il numero di esperimenti necessari ad esplorare tutte le variabili, una alla volta tenendo fisse le altre, avrebbe portato ad un numero di esperimenti enorme e non conciliabile con la natura e lo scopo del presente progetto di ricerca.

Pertanto sulla base dei dati di letteratura derivanti dall'indagine scientifica e tecnologica eseguita nelle prime fasi del progetto, dell'esperienza pratica maturata dagli autori nel settore dei gas idrati ed infine sulla base delle prime



Figura 119. Reattore per la formazione dei gas idrati

evidenze sperimentali ottenute, si è deciso di restringere il campo di indagine al fine di minimizzare il numero di esperimenti a quelli più significativi. Il numero complessivo di esperimenti effettuato è risultato pari a 98 (Allegato 1 al rapporto RdS/2013/264).

Lo scopo dell'attività di ricerca e sviluppo svolta nel corso della presente annualità è stato la realizzazione di uno screening sperimentale al fine di ottenere una caratterizzazione preliminare dei gas idrati della miscela CH₄-CO₂ per valutare l'applicabilità dei gas idrati come processo di purificazione del biogas.

I risultati dei test eseguiti confermano i dati di letteratura sul comportamento termodinamico delle miscele CH₄-CO₂ nella formazione di gas idrato. Le osservazioni sperimentali confermano inoltre anche le anomalie cinetiche di tale sistema, che determinano fenomeni in controtendenza con quanto prevedibile dai modelli termodinamici.

Con il presente studio si è caratterizzato il comportamento termodinamico e cinetico delle miscele CH₄-CO₂ con composizione 50/50, 60/40, 70/30 e 80/20, valutando gli aspetti relativi alla composizione della miscela, all'effetto di condizionanti cinetici e termodinamici, all'effetto del pH e della presenza di specie ioniche in soluzione. Tutti questi aspetti sono stati anche valutati in riferimento alla capacità di separazione ottenuta.

Dai risultati ottenuti la possibilità di effettuare l'upgrading del biogas a biometano mediante la formazione di gas idrati sembra essere ben supportata, in quanto emerge come con soli 2 stadi di separazione si possa ottenere una frazione del gas iniziale con un rapporto CH₄/CO₂ pari a 92/8, partendo da una composizione iniziale di 60/40.

Ulteriori sperimentazioni saranno però necessarie per confermare e raffinare i dati ottenuti e migliorare i risultati in termini di separazione e di miglioramento delle condizioni operative di un eventuale processo basato sulla formazione di gas idrati di biogas.

b.5 Sperimentazione su impianto pilota di gassificazione di un dispositivo per la separazione della CO₂ dal syngas mediante adsorbimento con sorbenti innovativi

Rimozione della CO₂ dal syngas mediante sorbenti solidi

La conversione di gas da gassificazione di biomassa in bio-SNG richiede alcuni passaggi finalizzati alla produzione di un gas adeguato alla conversione ottimale in metano. Dopo produzione del syngas, e a valle di un'adeguata purificazione dello stesso, tali passaggi riguardano l'aggiustamento della composizione in termini di rapporto H₂/CO e di rimozione della CO₂.

L'attività svolta presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia è relativa alla rimozione di CO₂ dalla corrente gassosa proveniente da un processo di gassificazione di biomasse lignocellulosiche, da inviare alla successiva conversione in metano, attraverso l'impiego di sorbente idrotalcitico [rapporto RdS/2013/180]. In particolare in questa attività è stato impiegato un sorbente commerciale denominato Pural MG70 prodotto dalla Sasol Germany GmbH.

Il sorbente è stato fornito sotto forma di polvere e nei test è stato utilizzato in questa forma, dopo attivazione secondo due modalità: a) per sola calcinazione; b) per impregnazione con K₂CO₃ e successiva ricalcinazione. Queste due procedure di attivazione sono state condotte in accordo con quanto noto per lo specifico sorbente.

La prima procedura è stata condotta per riscaldamento a 400 °C, la seconda per impregnazione con soluzione di K₂CO₃ via Incipient Wet Impregnation (IWI), essiccazione e successiva calcinazione a 400 °C.

Prima di procedere con il loro impiego con una corrente di syngas reale, i due materiali sono stati testati in una sezione predisposta di un apparato di scala laboratorio. Sono stati quindi condotti test di adsorbimento CO₂ su corrente di CO₂/N₂ e su una miscela gassosa di CO/H₂O/N₂. Tutti i test sono stati condotti a pressione atmosferica e a 400 °C. Per facilitare l'esecuzione delle prove, i sorbenti sono stati miscelati con olivina.

I test con CO₂ sono serviti come riferimento per verificare il comportamento dei due materiali dopo attivazione nelle condizioni di processo che si adotteranno inizialmente nei test con corrente reale. Le prove con la miscela CO/H₂O/N₂ sono invece servite per verificarne il comportamento in presenza di simultanea reazione di Water Gas Shift (WGS).

Da ultimo, sono stati condotti test in presenza di olivina arricchita in ferro, elemento per il quale sono note le proprietà catalitiche verso la reazione di WGS.

Dai test condotti su corrente di CO₂, si è avuta conferma del comportamento dei due sorbenti verso questo gas, stimando un assorbimento massimo del Pural MG70 attivato con K₂CO₃ nell'intervallo 20-30 mg CO₂/g sorbente, valore in buon accordo con quelli riportati in condizioni analoghe in letteratura.

I test condotti con la miscela CO/H₂O/N₂ hanno di fatto evidenziato le potenzialità dell'uso del sorbente per un aggiustamento in-situ della composizione del gas di alimentazione, tuttavia sui materiali recuperati alla fine delle prove, condotte sia senza sia con attivazione catalitica, si è riscontrato lo sviluppo di depositi carboniosi. Questo deposito è da ricondursi con ogni probabilità ad una possibile reazione di disproporzione del CO alimentato ed evidenzia la necessità di condurre una attenta valutazione sulla composizione della miscela di alimentazione al fine di evitare l'insorgere di tale problema nel corso della sperimentazione con la corrente reale.

Sintesi di sorbenti innovativi

A valle della campagna sperimentale svolta nella precedente annualità (rapporto RdS/2012/285), è emerso che le idrotalciti, idrossidi misti lamellari di cationi bivalenti e trivalente, compensati dall'anione carbonato, risultano grazie alla loro veloce cinetica di adsorbimento/desorbimento e resistenza meccanica il sorbente più vantaggioso da utilizzare nei processi SEWGS (Sorption Enhanced Water Gas Shift) al fine di ottimizzare il rapporto CO/H₂ per la reazione di metanazione.

Nella presente annualità presso i laboratori dell'Università dell'Aquila sono stati sintetizzati sorbenti a base di Mg-Al (HT1), Ca-Al (HT2), Mg-Ca-Al (HT3), con e senza impregnazione con K₂CO₃, prestando particolare attenzione al controllo del pH durante la fase sintesi e maturazione dei sorbenti, seguita dalla fase di lavaggio e filtrazione fino a pH 7 e, infine, da un trattamento termico di essiccazione e di calcinazione rispettivamente a 120 e 700 °C [rapporto RdS/2013/179].

Si è provveduto quindi alla caratterizzazione dei campioni attraverso analisi SEM, EDX, XRD, porosimetria BET e BJH, granulometria. Preliminarmente è stato studiato il comportamento termico dei materiali in TG-DTA al variare della temperatura. Sono stati condotti cicli di assorbimento e rigenerazione in TG-DTA, alternando flussi di anidride carbonica e di azoto, durante il programma termico impostato, garantendo le condizioni di isotermità durante la fase di cattura.

Dalle prove effettuate è risultato che l'effetto attivante del potassio è evidente a bassa temperatura e solo per l'HT1; esso si limita comunque al primo ciclo, mentre non è rintracciabile nei test ad alta temperatura in cui le HT2 e HT3 hanno prestazioni migliori senza impregnazione con valori massimi rispettivamente pari a 4,8 e 3,9 mmolCO₂/g di sorbente secco. La formazione dei carbonati, in accordo con le condizioni termodinamicamente favorevoli per la reazione di carbonatazione, si ravvisa sia nel segnale DTA che negli XRD dopo i test ad alta temperatura.

Per valutare la conversione e la capacità adsorbente in funzione del tempo sono stati effettuati test a gradino positivo in letto fluidizzato, variando istantaneamente la concentrazione della CO₂, operando in condizioni cicliche, in letto fluidizzato, a due diversi livelli di temperatura: 350/450 °C e 600/700 °C (adsorbimento/rigenerazione); i risultati sono stati studiati secondo un modello a perfetto miscelamento del primo ordine con tempo morto.

In conclusione, il sorbente a base di Mg e Al (HT1) lavora bene a basse temperature, raggiungendo una capacità massima di adsorbimento nel primo ciclo pari a 0,5 mmol CO₂/g sorbente. Il sorbente misto, a base di Mg, Ca e Al (HT3), unitamente a quello composto da Ca e Al (HT2, con capacità 1,61 mmol/g sorbente), lavora meglio ad alte temperature, mostrando sia alte rese di adsorbimento (1,87 mmol/g sorbente), sia stabilità ciclica, mantenendo pressoché costante la capacità sorbente. Il miglior risultato si ottiene nei test ad alta temperatura con vapor d'acqua, migliorando la capacità nel primo ciclo del 68%.

L'impregnazione dei campioni con carbonato di potassio sembra avere un effetto positivo soltanto nei cicli condotti a basse temperature. La capacità di adsorbimento dei campioni impregnati nei test condotti a 600 °C diminuisce, infatti, in tutti i sorbenti, in accordo con i risultati dei test condotti in TGA. Questo comportamento è imputabile sia all'alta temperatura di calcinazione (700 °C per 8 h), necessaria nel range di prova investigato, sia alla formazione di mayenite e fairchildite.

b.6 Sperimentazione di catalizzatori su supporti in materiale ceramico per l'upgrading del syngas via Water Gas Shift e ottimizzazione del processo di produzione di biometano a partire da syngas

La reazione di metanazione è un processo che ha trovato impiego come metodo per la purificazione di idrogeno ad alta purezza per raffineria o per impianti chimici (processi di idrogenazione e sintesi dell'ammoniaca).



Nel recente passato la metanazione ha attratto interesse nell'ambito delle applicazioni per la produzione di energia sia come reazione utile alla purificazione da CO dell'H₂ utilizzato in celle a combustibile ad elettrolita polimerico (PEFC) che nella produzione di metano per reazione della CO₂ prodotta da processi di combustione o di fermentazione anaerobica con l'idrogeno proveniente da altre fonti. Nel primo caso risulta necessario inibire la metanazione della CO₂ per evitare il consumo eccessivo di idrogeno, mentre nel secondo caso è proprio la metanazione della CO₂ l'oggetto del processo.

Tuttavia nella metanazione la selettività del CO rispetto alla CO₂ è complessa da ottenere e comunque limitata a intervalli di temperatura ristretti difficilmente controllabili per effetto dell'esotermicità della reazione. Nel caso specifico delle attività svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, la metanazione ha lo scopo di produrre gas naturale sintetico dal syngas ottenuto per gassificazione di biomasse lignocellulosiche e la selettività nella metanazione del CO rispetto a quella della CO₂ risulta meno determinante anche in virtù della presenza della reazione di water gas shift che contribuisce ad equilibrare il sistema e a modificare il rapporto CO/CO₂ e H₂O/H₂.

Sebbene i sistemi catalitici attivi nei vari processi siano simili, in particolare per i processi di metanazione del CO, le condizioni di processo sono tuttavia molto differenti, così come la cinetica e gli effetti termici.

I catalizzatori più attivi nella metanazione sono i metalli dell'VIII gruppo ed in particolare Ni, Rh e Ru, dove quest'ultimo risulta il metallo con maggiore selettività per la metanazione del CO rispetto alla CO₂, anche se in intervalli di temperatura molto limitati. I catalizzatori a base di Ni sono al contrario quelli maggiormente utilizzati in applicazioni industriali per il costo contenuto e recentemente è stata studiata l'aggiunta di Fe per aumentarne la selettività nella metanazione del monossido di carbonio CO.

Nell'ambito della presente annualità per la linea di attività riguardante lo sviluppo di sistemi di clean-up e di upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale è stato completato, presso il Centro ENEA della Trisaia, l'impianto per la produzione di gas naturale sintetico realizzato nella precedente annualità, in particolare per quanto concerne la sezione di miscelazione dei gas, la strumentazione di comando e controllo e le logiche di funzionamento [rapporto RdS/2012/233].

Sono state altresì condotte analisi termodinamiche e cinetiche, nonché valutazioni tecnico-impiantistiche al fine di verificare parametri come purezza e produttività ottenibili con differenti configurazioni di processo che possono fornire utili indicazioni preliminari per la fattibilità industriale.

Fissata la produttività in biometano, con un unico stadio di metanazione, l'utilizzo di un reattore di water gas shift preliminare alla metanazione può contribuire all'incremento nella purezza in metano, sebbene modesto, passando dal 65% v al 70-75% a seconda di come avviene l'assorbimento dell'anidride carbonica, se in un unico stadio o in uno stadio doppio di rimozione. In quest'ultimo caso, l'effetto complessivo è l'incremento del potere calorico del SNG da 24,5 a 25,5 MJ/Nm³.

In definitiva, mediante il processo di produzione di gas naturale sintetico ad un unico stadio di metanazione, in condizioni non isoterme, è possibile ottenere una produttività di circa 0,30-0,35 Nm³ di biometano/Nm³ di syngas con una purezza del 70-75% v, valore che può essere suscettibile di variazioni qualora si richiedano purezze superiori, ad esempio nel caso in cui si voglia utilizzare il gas per l'immissione in rete con i requisiti di qualità previsti dal codice Snam rete gas.

Altre valutazioni di tipo impiantistico sono ipotizzabili al fine di migliorare le prestazioni di processo. Una di queste è l'utilizzo di un reattore isoterma, sebbene di più difficile gestione impiantistica rispetto alla configurazione pseudo adiabatica, per la quale il calore prodotto dalle reazioni di WGS e metanazione viene solo parzialmente smaltito dai sistemi di reazione inficiandone l'efficienza chimica di processo. Mediante tale configurazione sarebbe possibile ottenere più elevati livelli di conversione con dimensioni del reattore più contenute e pertanto può rappresentare un'alternativa agli impianti tradizionali nell'ottica di realizzare impianti dimostrativi che possano fare da volano per lo sviluppo della tecnologia.

Produzione e sperimentazione di catalizzatori per la metanazione del syngas

La ricerca, svolta presso l'Università di Bologna, ha preso in esame catalizzatori ottenuti da precursori idrotalcitici (formula generale [M(II)_{1-x}M(III)_x(OH)₂]_x + (An-x/n) · mH₂O) che permettono di modificare la composizione del catalizzatore e le sue proprietà acido base e, quindi, verificare gli effetti dei vari parametri compositivi [rapporto RdS/2013/168].



Figura 120. Stazione di controllo BIOSNG

Sono stati preparati, da precursori idrotalciti, tre catalizzatori contenenti Ni/Mg/Al e un catalizzatore contenente Fe/Ni/Mg/Al (Tabella 35). I primi due sistemi catalitici presentano un rapporto $M^{2+}/M^{3+} = 2$ e due diverse percentuali di Ni (35 e 45% come NiO). Il terzo campione contiene sempre il 35% di NiO ma con un rapporto $M^{2+}/M^{3+} = 3$, ottenuto aumentando il contenuto di Mg, e ciò permette di studiare gli effetti di una maggiore basicità e di una maggiore diluizione del Ni nella matrice MgO. Un quarto campione contiene il 35% di NiO e il 23% di Fe_2O_3 con un rapporto M^{2+}/M^{3+} analogo al campione 1.

Tabella 35. Denominazione e composizione dei catalizzatori preparati da precursori idrotalcitici

Rapporti atomici Ni/Mg/Al /Fe				
	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Campione 4
Ni	24,5	33,33	24	26,66
Mg	42,2	33,33	51	40
Al	33,3	33,33	25	20
Fe	0	0	0	13,33
Totale	100	100,0	100	100,0
% di NiO	35,0	45,0	35,0	35,0
% di Ni ^o	27,1	34,8	27,1	33,33

I precursori ed i campioni calcinati sono stati caratterizzati attraverso XRD. I precursori mostrano la presenza della sola fase idrotalcitica, i campioni calcinati contenenti Ni evidenziano la fase ossido misto MgO-NiO mentre il campione Ni/Fe mostra la segregazione di fasi contenenti Fe che ne riducono la stabilità. I campioni sono stati caratterizzati con TPR SEM-EDX presso l'Università di Bologna e con analisi SEM, porosimetria e termogravimetria nei laboratori FN.

Il confronto delle prove catalitiche effettuate a 250 °C mostra come i campioni 2 e 3 siano gli unici attivi a questa temperatura. Un confronto fra i due campioni evidenzia chiaramente come la quantità di CO residua e la resa in metano del campione 3 siano maggiore rispetto al campione 2, nonostante il minore contenuto di Ni. Nelle prove effettuate a 300 °C tutti i campioni risultano attivi. Le differenze fra i campioni contenenti esclusivamente Ni sono meno marcate. I campioni 2 e 3 hanno valori prossimi all'equilibrio e simili fra loro, mentre il campione 1, presenta valori di resa nel metano inferiori. Il campione 3, diversamente dagli altri campioni, non mostra in nessun caso fenomeni di disattivazione. Il campione 4 contenente Fe mostra una attività molto più bassa. Inoltre evidenzia una conversione della CO₂ negativa, indice dell'attività nella reazione di water gas shift che produce CO₂.

Gli ottimi risultati del campione 3, che si è dimostrato essere il più attivo e stabile, sono stati ottenuti analizzando solo due composizioni con diversi rapporti M^{2+}/M^{3+} evidenziando che tale parametro è fondamentale per la metanazione e che il sistema potrebbe essere ulteriormente ottimizzato. Questo campione è stato quindi selezionato per produrre 100 g di catalizzatore per l'impianto pilota del Centro ENEA Trisaia. Il campione è stato preparato, calcinato a 650°C ed analizzato prima di essere inviato a destinazione.

Uno studio ulteriore, effettuato in parallelo a quello sopra descritto, riguarda la possibilità di impregnare campioni di Al₂O₃ prodotti da FN. Presso i laboratori di questa società si è pertanto proceduto allo sviluppo di un processo dedicato alla formatura in plastico di pellet in allumina idonei ad essere implementati con i catalizzatori a base di ossidi misti Ni-Mg-Al sviluppati dall'università di Bologna [rapporti RdS/2013/171 e 172].

Sono state effettuate diverse prove di miscelazione e di estrusione, variando sia la percentuale sia la composizione degli additivi organici, a parità di quantità e tipologia di polvere di allumina, giungendo alla conclusione che l'unico modo per rendere tale polvere compatibile con gli additivi e la componente polimerica necessaria per l'estrusione, era quello di effettuare estrusioni successive a carica minerale aumentata di volta in volta, in modo da far assimilare la componente polverosa mano a mano, senza avere fenomeni di separazione allumina-polimero e ancora peggio grippature della vite dell'estrusore dovute a questo fenomeno.

I risultati delle prove di impregnazione hanno mostrato che i pellet di allumina in fase alfa non sono idonei all'impregnazione a causa della porosità ancora bassa, seppur vicina a quella di target, mentre il lotto di pellet in gamma allumina si è dimostrato più affine all'impregnazione, risultando quindi un prodotto interessante, che però deve essere migliorato dal punto di vista della consistenza e resistenza meccanica.

In ogni caso, anche sulla base delle indicazioni fornite dall'Università di Bologna si è visto che vi sono ancora margini di miglioramento in entrambe le direzioni:

- per i pellet di tipo alfa, è possibile giocare ancora sui parametri di processo per aumentare la porosità;
- nel caso di pellet di tipo gamma, possono essere testati quelli ottenuti ad estrusioni ripetute e si possono

ottenere pellet più resistenti dal punto di vista meccanico.

E' quindi auspicabile poter continuare l'attività di ricerca per rendere possibile il raggiungimento di quanto sopra indicato e verificare sperimentalmente anche la loro rispondenza alle attività di catalisi per cui sono stati individuati e studiati.

b.7 Sperimentazione dei prototipi da laboratorio di sistemi di filtrazione ceramici attivati per la rimozione del particolato fine (< 10 µm) presente nelle emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida

Questa linea di attività prevedeva la realizzazione, la caratterizzazione e la verifica sperimentale di filtri ceramici porosi per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dalla combustione di biomassa solida, in particolar modo particolato fine (diametro < 10 µm).

A tal scopo ENEA si è avvalsa della collaborazione di FN S.p.A. e del Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.In.) dell'Università di Salerno per la realizzazione e la fornitura di dispositivi ceramici in scala di laboratorio di tipo wall flow, con i quali filtrare in maniera fisica e/o catalitica i fumi prodotti dalla combustione di biomassa legnosa [rapporti RdS/2013/173, 174 e 176].

Il comportamento di tali prototipi è stato verificato presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia. Per le prove sperimentali è stata utilizzata una caldaia a biomassa di potenza nominale pari a 30 kW, alimentabile a cippato e/o pellet, collegata al circuito idraulico di dissipazione del calore già presente all'interno della Hall Tecnologica.

Sono state condotte prove di combustione in caldaia di pellet di legno, ed è stata allestita un'apposita linea sperimentale sulla quale i filtri ceramici sono stati testati a varie condizioni di esercizio (temperatura e velocità superficiale) direttamente a contatto con una portata campionaria di fumi proveniente dal condotto fumario della caldaia [rapporto RdS/2013/184].

I dispositivi filtranti testati durante la campagna di prove sperimentali seguono la tecnologia *wall flow*, cioè sono costituiti da monoliti ceramici porosi (attivati o meno con catalizzatori), attraverso le cui superfici laterali la corrente gassosa da trattare (fumi) è costretta a passare. Si realizza di conseguenza un processo di filtrazione basato sia sui meccanismi di massa (inerziale, di intercettazione e di diffusione) che di superficie ("cake filtration").

In presenza di catalizzatori e ad adeguate temperature di esercizio le particelle carboniose adese alla superficie dei filtri e le molecole di gas organici che ne oltrepassano le pareti vengono quindi termodistrutte e convertite in composti più leggeri e meno inquinanti dal punto di vista ambientale.

I prototipi testati hanno tutti forma cilindrica piena, con altezza pari a 125 mm, al cui interno sono stati creati dei canali longitudinali a sezione quadrata, paralleli al flusso di gas che li investe. Tali canali sono alternativamente tappati con della pasta cementizia in corrispondenza di varie sezioni trasversali, in maniera quindi da costringere il passaggio dei fumi attraverso le loro pareti laterali. In Figura 121 si riporta lo schema funzionale dei filtri tipo *wall flow*.

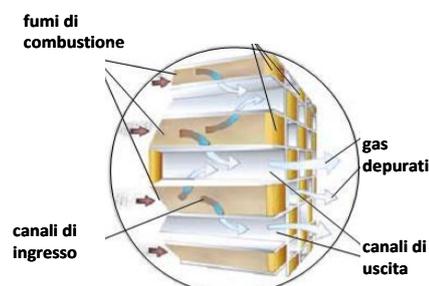


Figura 121. Schema funzionale dei filtri tipo wall flow

Le tipologie di filtri (Figura 122) sottoposte ad analisi sono state essenzialmente due, rispettivamente fornite da FN S.p.a. e dall'Università di Salerno (UNISA).

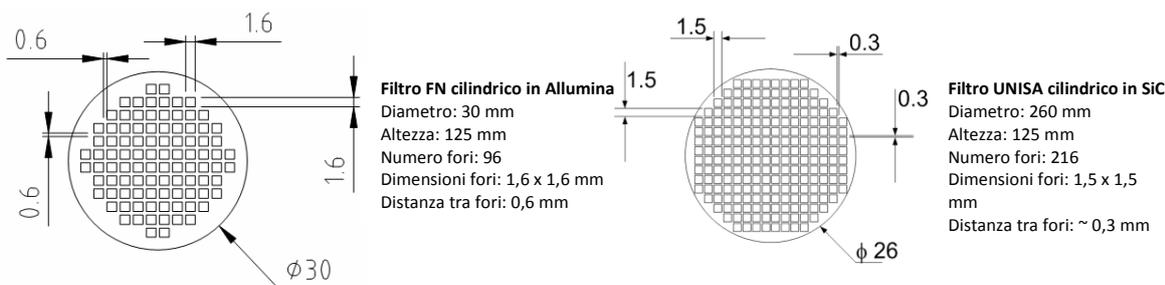


Figura 122. Sezione trasversale filtri prodotti da FN e dall'Università di Salerno

Per quanto riguarda i filtri forniti da FN S.p.A., sono state testate due differenti mescole ceramiche, con contenuti di allumina (Al₂O₃) rispettivamente pari a 60 e 92%. I filtri UNISA, invece, sono stati forniti tutti con la stessa

composizione di base in SiC, ma additivati con diverse percentuali di catalizzatore a base di ferrite di rame (CuFe_2O_4). Tali percentuali sono state rispettivamente: 0 (filtri bianchi), 15 e 25%.

L'osservazione dei dati sperimentali ha messo in evidenza una discreta efficacia dei filtri di tipo wall flow per la rimozione degli inquinanti dai fumi di combustione. Tuttavia, per la loro piena adozione in sistemi convenzionali di combustione della biomassa, risultano necessarie ulteriori prove sperimentali e l'individuazione della configurazione tecnica più idonea al fine di ridurne le perdite di carico e ottimizzare l'azione dei catalizzatori.

c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi

c.1 Studio e caratterizzazione termo-fluidodinamica di miscele di sali fusi in funzione del loro utilizzo in caldaie alimentate con biomassa lignocellulosica da associare ad impianti a fluidi secondari organici o acqua per la produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media taglia.

Le attività dell'obiettivo sono indirizzate a sviluppare sistemi innovativi di produzione di energia elettrica/cogenerativi di piccola-media taglia da biomasse lignocellulosiche, operanti ad un livello termico superiore ai sistemi ORC (Organic Ranking Cycle) attualmente in uso, e verificarne la fattibilità tecnica/economica e la maggiore efficienza energetica.

L'attività di ricerca in questo ambito è stata finalizzata ad individuare e caratterizzare possibili miscele di sali utilizzabili in caldaie a sali fusi ad alta temperatura ($> 450\text{ }^\circ\text{C}$) e con una temperatura di fusione più bassa rispetto alle miscele attualmente usate nei sistemi a concentrazione solare, in modo da poter ragionevolmente mantenere un'adeguata efficienza termica della caldaia.

I sistemi di caldaie a sali fusi sono già applicati in alcune applicazioni di nicchia dell'industria chimica e petrolchimica, e sono stati compiuti negli ultimi anni studi per investigare le possibilità di utilizzare questi fluidi inorganici come vettori energetici da caldaie a combustibile fossile, in associazione con sistemi di concentrazione solare ad alta temperatura per produzione di energia elettrica con cicli combinati. Non sono note finora attività di ricerca per l'associazione di combustori a biomasse con sistemi a sali fusi, neanche per il backup di impianti solari a concentrazione; soprattutto in una fascia di potenza medio/bassa compatibile con la co-generazione elettrica distribuita.

Considerando anche la loro utilità come fluidi termici per impianti solari parabolici a concentrazione, dove il range tipico di temperature di esercizio non supera, di norma, i $550\text{ }^\circ\text{C}$, le miscele di nitrati e nitriti possono rappresentare il materiale di prima scelta per il trasporto di calore da questo tipo di caldaie, e quindi consentono di lavorare a temperature più alte rispetto ai $390\text{ }^\circ\text{C}$ degli oli minerali, oli al silicone, sali organici.

In generale, rispetto ai gas o al vapore, i sali fusi hanno valori più elevati per il coefficiente di scambio termico, la capacità termica e la densità, hanno pressioni di lavoro inferiori e complessivamente una migliore capacità di trasporto del calore. Infatti, queste miscele presentano una buona capacità termica (quasi sempre maggiore o uguale a $1,5\text{ kJ K}^{-1}\text{ kg}^{-1}$) e una densità relativamente alta (non meno di $1,5\text{ kg/L}$ alle temperature di utilizzo). Queste due caratteristiche consentono un buon stoccaggio di calore sensibile per unità di volume. La viscosità è generalmente abbastanza bassa, con qualche eccezione, a seconda della temperatura e dei materiali usati, è in genere nell'ordine dei centipoise. Hanno inoltre un basso costo di approvvigionamento (vengono comunemente utilizzati come fertilizzanti) e un ridotto impatto ambientale in quanto in caso di perdita solidifica con facilità, senza che si abbia percolamento nel terreno o emissioni gassose in atmosfera.

Queste caratteristiche permettono quindi di avere per le apparecchiature dell'impianto dimensioni e costi di pompaggio inferiori, una maggiore efficienza di conversione del calore e un accumulo termico capace di garantire continuità alla produzione di energia elettrica, permettendo di evitare un funzionamento intermittente del gruppo turbo/generatore, ed evitare l'utilizzo di combustibili fossili per integrare le fermate del ciclo produttivo.

Il fluido più largamente utilizzato è una miscela binaria di nitrati di sodio (NaNO_3) e di potassio (KNO_3), denominata "solar salt" per il suo largo utilizzo in impianti solari a concentrazione. Chimicamente stabile fino a $600\text{ }^\circ\text{C}$, questo fluido presenta un punto di inizio solidificazione a circa $238\text{ }^\circ\text{C}$, per ragioni pratiche viene utilizzato in un range di temperatura da circa 280 a $550\text{ }^\circ\text{C}$.

L'attività svolta nel corso dell'anno ha riguardato in primo luogo lo studio delle proprietà di miscele di sali con più basso punto di fusione, confrontandole con quelle del "solar salt" preso come riferimento. In particolare, visto il potenziale interesse e la relativa mancanza di dati in letteratura, presso il Centro ENEA della Casaccia è stata intrapresa una campagna sperimentale per il confronto di una miscela basso fondente additivata con nitrato di calcio ed il "solar salt" [rapporto RdS/2013/019].

Riguardo alla possibilità di utilizzare delle miscele di nitrati/nitriti come fluido intermedio di scambio termico fra una caldaia alimentata con biomasse ed un fluido per un ciclo Rankine organico, dalla letteratura scientifica si ricava che:

- il solar salt presenta bassi costi ed una relativamente alta stabilità termica. Il punto di inizio solidificazione a 238 °C sembra essere la limitazione più rilevante per il suo utilizzo;
- il prodotto commerciale HITECH[®] salt, che consiste di una miscela di NaNO₃/KNO₃/NaNO₂ con la composizione in peso di 7/53/40, presenta una bassa temperatura massima di utilizzo a meno che non si operi in atmosfera di azoto. Il principale vantaggio è rappresentato dal basso punto di congelamento;
- le miscele contenenti nitrato di litio presentano un basso punto di fusione e, come confermato da prove effettuate presso l'ENEA, una stabilità comparabile a quella del "solar salt". Lo svantaggio è rappresentato dal costo che potrebbe essere da 3,5 a 5 volte più alto rispetto al solar salt. La compatibilità con i materiali ad alta temperatura è in fase di valutazione.

Molti meno dati erano disponibili riguardo le miscele contenenti nitrato di calcio, e per questo motivo si è deciso di effettuare delle prove sperimentali su quella riportata in letteratura come la più basso fondente, corrispondente ad una percentuale in peso per NaNO₃/KNO₃/Ca(NO₃)₂ di 15,3/42,5/42,2. Dai risultati della sperimentazione in oggetto è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- il punto di inizio congelamento si abbassa considerevolmente (126 °C);
- la viscosità è sempre più alta rispetto al solar salt e si innalza a valori di centinaia di cP vicino al punto di solidificazione;
- la capacità termica è comparabile a quella del solar salt;
- dalla letteratura scientifica, si evince che anche i valori di densità e conducibilità termica non sono significativamente differenti fra questo ternario ed il solar salt, anche le proprietà riguardo alla corrosione sembrano paragonabili;
- la temperatura massima di utilizzo per la miscela ternaria è riportata come 500 °C. Comunque, le prove sperimentali effettuate all'ENEA evidenziano una lenta, ma rilevabile, formazione di ossido e carbonato (quasi sicuramente di calcio) sopra i 420 °C, per cui sarebbe necessario effettuare prove di stabilità termica di lunga durata anche per l'intervallo 420-500 °C.

In sostanza, si può concludere che, oltre al solar salt, che è un fluido termico di impiego ben consolidato, altre due miscele possono essere oggetto di sperimentazione come possibili fluidi termovettori per caldaie a biomasse:

- la miscela ternaria Na-K-Ca, che presenta un costo sensibilmente inferiore rispetto a quella contenete nitrato di litio, pur con un punto di inizio congelamento paragonabile. Il suo utilizzo potrebbe rappresentare una valida alternativa in termini di riduzioni di costi di investimento e disponibilità dei componenti, ma è necessario verificare gli aspetti legati alla stabilità termica con prove sperimentali di lunga durata;
- la miscela contenente nitrato di litio (NaNO₃/KNO₃/LiNO₃ nella percentuale in peso di 18/52/30) che è, sicuramente più costosa, ma limitandone l'uso come fluido di trasporto termico, le quantità di utilizzo potrebbero non incidere in maniera significativa sul costo totale di un impianto. Un'appropriate analisi sarà necessaria su questi aspetti tecnico-economici, in maniera da verificare la possibilità di utilizzo di un materiale che riguardo al range di temperatura permesso (da poco sopra i 120 °C ad almeno 550 °C) rappresenterebbe la migliore scelta.

Parametri progettuali di caldaie a sali fusi alimentate a biomasse

Le attività, svolte in collaborazione fra l'ENEA e l'Università di Roma Tre, hanno riguardato lo studio di un nuovo impianto integrato costituito da una caldaia a sali fusi alimentata con biomassa legnosa, interfacciabile con il sistema di accumulo di impianti solari termodinamici, sviluppato da ENEA, in modo da garantire l'integrazione e la termoregolazione con la fonte solare [rapporto RdS/2013/149].

Si è proceduto schematizzando l'impianto a sali fusi in due componenti fortemente integrati ma distinti: il generatore di gas caldi a biomassa e lo scambiatore di calore fumi - sali fusi.

Per quanto riguarda il generatore di gas caldi, l'attuale panorama costituito dai diversi tipi di bruciatori operanti a biomassa è particolarmente ampio. Per l'applicazione oggetto di studio, si è ritenuto importante fare riferimento alla categoria di bruciatori che trova frequente impiego nel settore agro-industriale. Tale categoria è quella che realizza la combustione su griglia mobile e che assicura elevata flessibilità operativa nei confronti della biomassa utilizzata, in termini di pezzatura, umidità e provenienza. In quest'ambito, sono state sintetizzate le conoscenze sulle apparecchiature disponibili nella fascia di potenza 1-6 MW termici e sono stati determinati i livelli di temperatura dei fumi all'ingresso dello scambiatore fumi - sali fusi.

Relativamente alle caratteristiche (potenza e rendimento) dell'impianto NORC in fase di sviluppo (attività c.2), è emersa la necessità di fissare la taglia dell'unità a biomassa in base alla potenza termica da trasferire al vettore termico sali fusi, nell'ordine dei 5 MW. Sempre in base alle caratteristiche dell'impianto NORC, sono state fissate le temperature di ingresso e uscita del sale, e quindi la tipologia di miscela di sali (eutettica ternaria).

Una volta acquisite le caratteristiche delle miscele di sali tramite le informazioni messe a disposizione da ENEA, definendo le caratteristiche del vettore termico nel campo di utilizzo, si è proceduto alla definizione della problematica relativa al dimensionamento dello scambiatore di calore.

Le attività hanno preso in considerazione, oltre agli usuali aspetti termodinamici, gli aspetti termo fluidodinamici, termofisici e reologici introdotti dall'impiego dei sali fusi come vettore termico. Sono state individuate le sezioni sottoposte a maggior cimento termico e sono state valutate le temperature delle superfici metalliche più a rischio per quanto riguarda i fenomeni di ossidazione-erosione a caldo, concludendo che tali temperature sono contenute entro limiti accettabili per i materiali metallici di consolidato utilizzo. Dallo studio svolto, non sono emersi elementi di natura tecnica che impediscono la realizzazione dello scambiatore fumi-sali o che ne possono penalizzare significativamente la funzionalità.

Sono state individuate le portate dei fluidi e la superficie di scambio termico di massima e sono state prese in considerazione, per lo scambiatore di calore sali fus -fumi, due possibili architetture costruttive, che presentano entrambe aspetti interessanti: la prima a "tubi di sale", la seconda a "tubi di fumo".

Per quanto riguarda l'architettura a tubi di sale, con l'ausilio della modellazione nell'ambiente di calcolo AMESim®, sono state valutate in dettaglio le temperature dei fluidi nelle diverse sezioni. Si sono quindi evidenziati i parametri per la collocazione più efficace di una sezione destinata al recupero termico a bassa temperatura, di una sezione con scambio misto radiativo - convettivo ad alta temperatura (con funzione di depolverazione associata) e della sezione a media temperatura di scambio convettivo; sono state quindi fissate le temperature nelle tre sezioni dell'impianto.

Per l'architettura a tubi di fumo, si è effettuata la progettazione preliminare dello scambiatore, che è risultato di limitata lunghezza per quanto riguarda il passaggio fumi (circa 6 metri), ma al contempo si sono evidenziate le problematiche relative al fatto che i vincoli imposti dalla soluzione architettonica prospettata portano necessariamente ad una sezione di passaggio per il sale di elevata entità, con una velocità di attraversamento limitata. Lo studio e il dimensionamento preliminare degli scambiatori a tubi di fumo ha messo in luce la necessità di un'ulteriore fase di studio condotta in ambiente 3D-CFD per analizzare e ottimizzare i percorsi del sale attorno alle superfici di scambio termico.

In conclusione, le due architetture esaminate presentano aspetti di notevole interesse ai fini del loro impiego in impianti integrati che vedono la presenza di caldaia a biomassa, di sistema di accumulo termico a sali fusi provenienti da impianti solari a concentrazione e di impianti NORC. I dimensionamenti preliminari effettuati sono idonei ad essere assunti come base per il successivo dimensionamento definitivo degli scambiatori.

c.2 Definizione e studio di fluidi organici o loro miscele in grado di operare a temperature massime superiori a quelle attualmente in uso, per impieghi in ORC, e valutazione dei cicli termodinamici più performanti ai fini energetici

Le attività previste nell'ambito della presente linea progettuale si proponevano di valutare, dal punto di vista tecnico, energetico ed economico, la fattibilità di sistemi innovativi per la produzione di energia elettrica e termica da biomasse legnose di taglia non superiore a 1 MW_e. In particolare, l'indagine è stata rivolta ad individuare la possibilità di utilizzare i sali fusi come fluido termovettore tra la caldaia ed il motore primo, e di utilizzare unità di cogenerazione innovative basate su cicli Rankine in grado di operare ad alta temperatura. Tra gli obiettivi vi era quello di individuare configurazioni in grado di raggiungere rendimenti elettrici e globali superiori alle attuali unità ORC di pari potenza.

In tale contesto, s'inserisce la presente attività di implementazione di modelli di calcolo per la simulazione delle prestazioni degli impianti costituiti da un generatore di calore a biomassa solida abbinato ad un'unità di cogenerazione di taglia non superiore a 1 MW_e [rapporto RdS/2013/263]. Tra le finalità del modello di calcolo sviluppato, vi è la valutazione ed il confronto tra differenti condizioni di lavoro del sistema sopra menzionato per verificarne la fattibilità dal punto di vista energetico ed i rendimenti complessivamente raggiungibili.

L'attività svolta ha portato alla definizione e all'implementazione in ambiente Matlab® di un modello a parametri concentrati per il calcolo dei bilanci di massa e di energia e delle principali variabili operative di un generatore di

calore alimentato a biomassa solida, costituito da sezione di combustione, caldaia, recuperatori di calore per l'aria primaria e secondaria e ricircolo fumi.

Il modello è stato utilizzato per l'analisi ed il confronto tra diversi casi studio di un impianto cogenerativo costituito da una caldaia a sali fusi alimentata a biomassa legnosa abbinata ad un'unità cogenerativa a ciclo Rankine in diverse condizioni di funzionamento. In particolare, il modello è stato applicato all'analisi di unità di cogenerazione da 200 kWe e da 1 MWe. Per l'impianto da 1 MWe sono state analizzate diverse configurazioni, al variare del rendimento elettrico del ciclo termodinamico e della temperatura di ritorno dei sali fusi in caldaia.

I risultati ottenuti hanno permesso di effettuare delle valutazioni preliminari in merito ai principali parametri energetici del sistema e alla loro influenza sul rendimento di produzione termica.

Il modello implementato, una volta integrato con i componenti previsti, permetterà di eseguire valutazioni integrate di tipo energetico ed economico sui sistemi di cogenerazione alimentati da generatori a biomassa solida.

Parallelamente allo sviluppo del modello, uno studio approfondito per la ricerca di cicli termodinamici e fluidi di lavoro innovativi per applicazioni con caldaie a sali fusi alimentate a biomassa legnosa è stato svolto dal Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, in stretta collaborazione con ENEA [RdS/2013/178].

In sintesi, i quesiti a cui si è cercato di dare una risposta sono: quali sono le condizioni di fattibilità di un sistema innovativo cogenerativo di taglia non superiore a 1 MW_{el} abbinabile ad una sorgente termica a sali fusi a temperatura di almeno 450 °C e quali i relativi vantaggi ottenibili, sia in termini energetici che economici.

L'analisi svolta ha consentito di dare una risposta positiva ad entrambi i quesiti, soprattutto per le taglie superiori, evidenziando i significativi vantaggi ottenibili operando a temperature più elevate rispetto ai valori usuali. In particolare:

- si è identificato un potenziale fluido di lavoro (tetracloruro di titanio, TiCl₄) che, oltre a possedere la stabilità termica a temperature molto elevate e ad avere costi estremamente contenuti, presenta caratteristiche termodinamiche (punto critico, complessità molecolare, massa molecolare) ideali per l'accoppiamento con la sorgente termica considerata;
- si è identificato uno schema d'impianto che prevede l'adozione di un ciclo di potenza ipercritico e un circuito intermedio ad olio fra il tetracloruro di titanio e l'acqua destinata al teleriscaldamento;
- si è effettuato un pre-dimensionamento dei principali componenti d'impianto, che ha dato luogo a risultati promettenti, basato sull'adozione di una turbina a tre stadi, poco sollecitata meccanicamente e di buon rendimento fluidodinamico, e scambiatori di calore di dimensioni contenute, con una soluzione innovativa per il recuperatore di calore.

Fra le diverse soluzioni esaminate per la potenza su cui si è concentrato lo studio (1 MW_{el}), le più promettenti portano ai seguenti risultati:

- un rendimento netto dell'impianto ORC dell'ordine del 24-25%, superiore di circa 6 punti (e quindi del 30%) rispetto all'attuale "stato dell'arte": un risultato di tutto rispetto, che conferma l'utilità di ricercare soluzioni che consentano di elevare la temperatura di introduzione di calore nel ciclo;
- costi dell'energia elettrica prodotta dell'ordine di 165-170 €/MWh, che sono di indubbio interesse nell'attuale contesto normativo-tariffario italiano;
- il mantenimento di elevati rendimenti di conversione anche ai carichi parziali, con una modalità di regolazione del carico semplice (si agisce sulle valvole di parzializzazione della turbina, variando la portata massica fluente nell'impianto, mantenendo il ciclo termodinamico quasi invariato), che garantisce una buona elasticità operativa dell'impianto.

Le prestazioni sopra indicate peggiorano nettamente per potenze unitarie più basse: in particolare, il costo dell'energia elettrica per un impianto da 200 kWe arriverebbe a valori dell'ordine dei 300 €/MWh, quasi doppi rispetto ai casi da 1000 kWe.

Si vuole peraltro sottolineare come l'uso del fluido scelto, mai proposto, ad oggi, in cicli di potenza, richiede precauzioni specifiche: in particolare, va totalmente eliminata la possibilità di contatti fra fluido e acqua (con la soluzione proposta dell'adozione di un circuito intermedio ad olio diatermico).

Si auspica pertanto che possano essere in futuro implementate altre fasi della ricerca, che consentano di approfondire alcuni fondamentali punti ancora aperti: in primis, sarebbe di grande utilità progettare e realizzare un impianto di prova di taglia ridotta, che permetta di identificare tutte le procedure e gli accorgimenti che l'utilizzo del fluido proposto richiede per ottenere gli indispensabili requisiti di sicurezza e protezione ambientale, nonché di ottenere conferme sulle proprietà termodinamiche e di scambio termico del fluido. Una volta risolti questi problemi, si potrebbe passare alla realizzazione di un prototipo a scala reale.

d. Supporto ai Ministeri e collaborazioni internazionali

Il diffuso interesse, a livello nazionale e internazionale, verso un uso crescente di biomasse e rifiuti organici di diversa natura per la produzione di energia elettrica e nuovi vettori energetici (ad es. l'idrogeno), ha determinato anche nel corso dell'annualità 2012 dell'Accordo di Programma sulla Ricerca di Sistema Elettrico il coinvolgimento dell'ENEA in importanti contesti sia a livello nazionale, con una costante attività di supporto alla Pubblica Amministrazione, per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore della produzione di energia da fonti rinnovabili, con particolare riferimento alle biomasse, sia in campo internazionale, con l'obiettivo di favorire il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali sul tema della bioenergia.

In particolare, nel periodo di riferimento ENEA ha partecipato, in rappresentanza dell'Italia, agli Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) sulla Bioenergia (Bioenergy Implementing Agreement, www.ieabioenergy.com).

Per il Bioenergy Implementing Agreement (IEA/BA) l'ENEA ha coordinato, insieme al GSE, il contributo delle altre strutture nazionali interessate e partecipato direttamente alle attività dell'Executive Committee e delle seguenti Task:

- Task 33 - Thermal gasification of biomass (www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=33)
- Task 42 - Biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass (www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=42).

La Task 33 svolge attività di monitoraggio, analisi e scambio di informazioni su ricerca, sviluppo, dimostrazione e commercializzazione, concernenti la gassificazione delle biomasse. Tali attività vengono condotte cercando un continuo ed attivo coinvolgimento delle industrie operanti nel settore delle bioenergie e favorendo la cooperazione tra i Paesi partecipanti alla Task, con l'obiettivo di fornire un contributo utile alla rimozione delle barriere che attualmente ostacolano il successo di questa tecnologia, promuovendo la commercializzazione di processi di gassificazione delle biomasse efficienti in termini energetici, economicamente competitivi e sostenibili da un punto di vista ambientale.

La Task 42 si occupa invece di attività e tecnologie connesse allo sviluppo delle bioraffinerie, ovvero di piattaforme tecnologiche integrate attraverso le quali le biomasse in ingresso vengono trasformate in combustibili, energia e prodotti chimici in maniera analoga a quanto avviene in una raffineria convenzionale.

Nell'ambito dei meeting periodici dell'Executive Committee dell'IEA/BA (Vienna, 12 novembre 2012 e Cape Town 21-23 maggio 2013), sono state svolte azioni di scambio di informazioni sui programmi dei diversi Paesi, analisi congiunte delle tecnologie di interesse e azioni di networking fra Enti e Istituti di Ricerca per l'avvio di possibili collaborazioni per attività di ricerca su tematiche specifiche.

Per quel che riguarda più in particolare la partecipazione alla Task 33, nel mese di novembre 2012, nell'ambito della IEA Bioenergy Conference di Vienna, i ricercatori ENEA hanno partecipato a vari meeting tematici e sono stati coinvolti nelle visite tecniche presso gli impianti industriali di gassificazione delle biomasse legnose di Gussing ed Obertwart, dove sono stati oggetto di discussione con gli esperti internazionali presenti gli ultimi sviluppi in merito alle attività sperimentali portate avanti presso i suddetti impianti e, più in generale, sulla produzione di biocombustibili liquidi e biometano da syngas.

Per quanto attiene la partecipazione italiana alle attività della Task 33, è stato prodotto un "Country Rapport" (www.ieatask33.org/content/country_rapportos) ed è stato effettuato sul relativo portale WEB (www.ieatask33.org/content/thermal_gasification_facilities) l'aggiornamento dell'elenco degli impianti di gassificazione presenti sul territorio nazionale.

Per quanto riguarda le attività svolte nell'ambito della task 42 durante il 2012 si segnalano in particolare:

- Il convegno "Advanced Biofuels in a Biorefinery Approach" (28 Febbraio - 1 Marzo 2012) a Copenhagen, dove l'ENEA ha presentato la relazione "Current status of Biorefinery in Italy - R&D activities";
- l'organizzazione di una sessione dedicata nell'ambito della 20th European Biomass Conference (Copenhagen, giugno 2013), con presentazioni orali da parte dei delegati dei diversi Paesi partecipanti alla Task;
- la pubblicazione del rapporto "Bio-Based Chemicals" (<http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/publications>); il rapporto è stato presentato al Workshop sulle Bioraffinerie organizzato a Bari presso la facoltà di Biotecnologie;
- la raccolta dati da parte dei vari delegati nazionali per la pubblicazione della nuova brochure sui casi di successo delle bioraffinerie nel mondo (2013);
- la redazione di un "Country Rapport" (<http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/country-rapportos/>).

Inoltre, ENEA ha curato la partecipazione nazionale alle attività di EERA (European Energy Research Alliance) sulla Bioenergia. Per quanto concerne il JP sulla Bioenergia, si segnala la partecipazione al Workshop del Gruppo di Lavoro SP5 su “Stationary Bioenergy” (Trondheim, 27-28 maggio 2013), dove ogni istituto partecipante (per l’Italia l’ENEA) ha presentato le principali attività svolte e le tematiche di interesse del suddetto GdL.

Si è riscontrata una prevalenza di attività sulla gassificazione, in particolare relativamente all’utilizzo di combustibili derivati (per es. torrefied fuels) e alle varie tecnologie di pretrattamento del combustibile e utilizzo in co-combustione e, nella seconda giornata, sono stati illustrati in dettaglio finalità e obiettivi delle attività svolte da ciascun partner.

Sulla base del programma di ricerca indicato per i tre WP e di quanto presentato dai vari istituti, sono emerse alcune tematiche di interesse per ENEA, con specifico riferimento alle attività svolte nell’ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, come:

- analisi LCA della filiera legno-energia;
- analisi sulla disponibilità di biomassa;
- sistemi CHP con integrazione di biomassa e solare;
- analisi e modellazione di sistemi CHP.

Vista la varietà e complessità dei temi oggetto di studio all’interno del Joint Programme, suddiviso in tre diverse linee di attività (WPs), si è deciso di procedere con una definizione per ogni Paese di: situazione energetica, stato dell’arte, problemi, tecnologie e strumenti di analisi e calcolo presenti nei vari istituti. Verranno a questo proposito forniti dei format specifici da compilare a cura di ciascun istituto. Nel frattempo, si procederà a redigere documenti di review sullo stato dell’arte delle varie tecnologie, approfondendo gli aspetti critici che saranno concordati sulla base dei risultati dell’indagine nei singoli stati.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Le attività descritte nel precedente paragrafo sono state svolte in stretta collaborazione fra i ricercatori delle Unità Tecniche dell’ENEA e quelli delle strutture di ricerca universitarie riportate nel seguito.

Organizzazione	Attività
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale	Sviluppo di processi innovativi per la produzione di biogas a p più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno da matrici non convenzionali (linea di attività a.3)
Università della Tuscia Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche	Pretrattamento biologico di biomasse ligno-cellulosiche per l’ottenimento di substrati idonei alla produzione di biogas (linea di attività a.4)
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Chimica	Ottimizzazione delle condizioni di processo per colture microalgali mediante controlli chimico-analitici (linea di attività a.5)
Università della Calabria Dipartimento di Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica	Supporto sperimentale al processo di gassificazione di biomasse e rifiuti con catalisi eterogenea in condizioni supercritiche SCWG (linea di attività a.6)
Università di Salerno Dipartimento di Ingegneria Industriale	Sviluppo di sistemi catalitici per il clean-up di biocombustibili e riduzione dell’impatto ambientale (linee di attività b.1 e b.7)
Sapienza Università di Roma Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente	Studio dei processi chimico-fisici di upgrading del biogas a biometano mediante formazione e separazione di idrati di CO ₂ (linea di attività b.4)
Università di Firenze Dipartimento di Chimica	Indagini sperimentali sulla cattura di CO ₂ con nuovi metodi a basso consumo energetico (linea di attività b.4)
Università dell’Aquila Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell’Informazione e di Economia	Studio e sperimentazione sulla cattura del biossido di carbonio da miscele gassose tramite sorbenti (linea di attività b.5)
Università di Bologna Dipartimento di Chimica Industriale	Produzione e sperimentazione di catalizzatori per la metanazione del syngas da gassificazione di biomasse (linea di attività b.6)
Università di Roma Tre Dipartimento di Ingegneria	Studio dei parametri progettuali per la realizzazione di caldaie a sali fusi alimentate con biomasse lignocellulosiche (linea di attività c.1)
Politecnico di Milano Dipartimento di Energia	Definizione e studio di fluidi organici o loro miscele in grado di operare a temperature massime superiori a quelle attualmente in uso e valutazione dei cicli termodinamici (linea di attività c.2)

FN, Nuove Tecnologie e Materiali Avanzati S.p.A., cobeneficiaria dell'ENEA, ha contribuito alle attività dell'obiettivo b. Sviluppo di sistemi di clean-up e upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale, con specifico riferimento alle linee di attività (sottobiettivo b.6 e b.7), conducendo presso i propri laboratori attività sperimentali finalizzate allo sviluppo e caratterizzazione di supporti ceramici per l'upgrading del syngas e la rimozione del particolato fine presente nelle emissioni gassose prodotti dalla combustione di biomassa solida.

Uno specifico contratto di servizio per l'acquisizione di competenze tecniche è stato affidato dall'ENEA alla **Società RDPower S.r.l.** nell'ambito delle attività dell'obiettivo b (linea di attività b.4), per la realizzazione di apparati sperimentali e l'esecuzione di prove di laboratorio per lo studio degli idrati di miscele metano/anidride carbonica finalizzato all'upgrading del biogas mediante formazione di idrati.

Energia elettrica da fonte solare

Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

L'attività di ricerca che si propone, punta ad innovare alcune delle attuali tecnologie fotovoltaiche per ottenere dei prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi. Negli ultimi anni i prezzi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie soprattutto all'incremento della produzione, con la creazione di grandi unità produttive in Asia che ha determinato una diminuzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia l'abbassamento di tali costi a valori inferiori a 0,5 €/Wp potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti adottati.

Le tecnologie fotovoltaiche basate su film sottili di materiale semiconduttore presentano grandi potenzialità di riduzione di costo. Tale obiettivo potrà essere dimostrato attraverso il miglioramento delle prestazioni degli attuali moduli a film sottile, superando le difficoltà di alcune tecnologie legate all'utilizzo di materiali scarsamente disponibili, e grazie allo sviluppo di nuovi moduli basati su materiali organici.

I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie ad una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari a base di silicio "micromorfe" che consentono di ottenere prodotti più efficienti. Questo tipo di architettura di dispositivo ha una struttura piuttosto complessa nella quale la geometria del substrato e ciascuno degli strati attivi che la compongono hanno un impatto sull'intero dispositivo. Il miglioramento delle prestazioni e la riduzione dei costi possono essere ottenuti, migliorando l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo, grazie allo sviluppo di nuove architetture di dispositivo e di materiali innovativi che consentano di semplificare il processo di fabbricazione.

Sempre nell'ottica di utilizzare piccole quantità di materiale semiconduttore e processi a bassa temperatura, appare interessante indagare la possibilità di studiare dispositivi a eterogiunzione (a-Si/c-Si) che utilizzino wafer sottili di silicio cristallino. Anche in questo caso l'architettura del dispositivo è determinante per ottenere un buon assorbimento della radiazione solare.

L'attività sui film sottili policristallini di $Cu_2-II-IV-VI_4$ parte dall'idea di valutare la possibilità di sostituire l'indio nel $CuInSe_2$ (CIS) con coppie di elementi II-IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Questo favorirebbe un'espansione di massa di tale tecnologia per il fotovoltaico a film sottile, risolvendo i potenziali problemi dovuti alla scarsità dell'indio. Nei prossimi anni, infatti, i moduli basati sul leghe CIGC (Copper Indium-Gallium Selenide) raggiungeranno costi nettamente inferiori ad 1 \$/W ed efficienza >14%, ma l'intera produzione mondiale potrebbe dare un massimo di 10 GW/anno di moduli FV in CIGS. Da ciò si può comprendere l'importanza degli studi volti alla eliminazione dell'indio. L'argomento proposto presenta però anche altre possibilità visto che la famiglia dei composti $Cu_2-II-IV-VI_4$ è ancora poco studiata e presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio. E' quindi anche possibile, in linea di principio, utilizzare questi materiali per la fabbricazione di celle a multigiunzione a basso costo. Il problema fondamentale da superare per raggiungere questo obiettivo è quello di individuare materiali adatti per la realizzazione della giunzione tunnel necessaria a connettere le diverse celle. Si tratta quindi di una ricerca ad alto rischio ma che presenta grandi vantaggi ed alto tasso di innovazione.

Lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. Al momento l'ingresso nel mercato della tecnologia FV organica è legato ad applicazioni di nicchia quali caricabatterie, alimentatori portatili per applicazioni militari, etc.. Per dimostrare, invece, il potenziale di tale tecnologia per la produzione di energia in applicazioni di potenza è necessario ottenere celle solari con adeguate efficienze di conversione stabili nel tempo. Le attività proposte su tale tema punteranno a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici che assorbano la radiazione solare in modo più efficiente e modificando l'architettura di cella per ottenere un efficiente trasferimento di carica tra i materiali costituenti lo strato attivo.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto ha l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche ritenute potenzialmente interessanti per la realizzazione di moduli FV caratterizzati da buone efficienze di conversione e bassi costi di

produzione. Lo scopo delle attività è di mettere a disposizione del Paese tecnologie fotovoltaiche avanzate che possano contribuire a rendere il sistema produttivo nazionale innovativo e competitivo in questo settore. La ricerca nel settore FV è, ovviamente, motivata anche dal crescente fabbisogno di energia e dalle grandi potenzialità del FV nel rispondere a tale esigenza. Inoltre lo sviluppo di moduli fotovoltaici innovativi può consentire la realizzazione di componenti specifici per l'integrazione del fotovoltaico in edilizia permettendo all'utenza la possibilità di installare sistemi di produzione di energia elettrica con buona efficienza, lunga durata e costo competitivo anche in contesti sensibili, con i conseguenti vantaggi economici.

L'attività è focalizzata sullo sviluppo di tecnologie FV a film sottile di materiali semiconduttori, prestando attenzione all'utilizzo di materiali a basso costo, ampiamente disponibili e non tossici. In particolare le attività sono state focalizzate sullo sviluppo di celle solari a film sottili inorganici a base di silicio e di film policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ e sullo sviluppo di celle FV organiche.

L'attività sulle celle solari a film sottile di silicio ha l'obiettivo di sviluppare materiali innovativi e architetture di dispositivo con lo scopo di migliorare le attuali prestazioni di celle tandem micromorfe realizzate con una cella posteriore di silicio microcristallino e una anteriore di silicio amorfo. In particolare è stato sviluppato uno strato innovativo di tipo p a base di ossido di silicio microcristallino con caratteristiche ottiche migliori rispetto ai film precedentemente utilizzati. Con questo strato è stato possibile migliorare in termini di corrente di cortocircuito le prestazioni delle celle. Si è poi lavorato all'ottimizzazione dell'assorbimento della luce, sviluppando possibili strategie sia sulla parte frontale che sulla parte posteriore della cella per confinare la radiazione all'interno del dispositivo. Per quanto riguarda la parte frontale della cella, parallelamente allo sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi (TCO) naturalmente testurizzati, attività in corso già nelle precedenti annualità, si è lavorato alla messa a punto di processi di strutturazione del vetro, utilizzando due possibili tecniche: la nanostrutturazione auto-organizzata tramite Proiezione Ionica Litografica (IPL) e l'Aluminium Induced Texture (AIT). In entrambi i casi sono stati ottenuti risultati incoraggianti. I dispositivi fabbricati sui substrati nanostrutturati hanno infatti mostrato una migliore risposta spettrale, e quindi una corrente di corto circuito più alta, rispetto ai valori misurati sul substrato non trattato. È stata avviata un'attività sulla modellizzazione ottica dei substrati testurizzati con lo scopo di valutare l'influenza della morfologia superficiale sull'intrappolamento della radiazione. Sono stati inoltre progettati riflettori posteriori in configurazione aperiodica, proponendo varie strutture di cella con lo scopo di massimizzare l'assorbimento della luce nei dispositivi. Per verificare la fattibilità e le potenzialità delle strutture proposte è in corso una sperimentazione con un sistema di nanolitografia avanzato, quale il Focused Ion Beam (FIB), mediante il quale sono stati eseguiti test preliminari che hanno consentito di realizzare alcuni prototipi di celle.

Per quanto riguarda la ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili, sono stati analizzati gli step critici di processo che possono condizionare le prestazioni dei dispositivi. In particolare si è lavorato all'ottimizzazione dell'ossido trasparente e conduttivo frontale, valutando la possibilità di introdurre un multistrato $\text{ZnO}/\text{Ag}/\text{ZnO}$ con idonee caratteristiche ottiche ed elettriche. È continuato il lavoro sullo sviluppo di riflettori posteriori a multistrato in configurazione Bragg ottenuti alternando strati di silicio amorfo e nitruro di silicio e sullo sviluppo di processi di testurazione dei wafer, entrambe le tematiche sono di fondamentale rilevanza quando si utilizzino wafer sottili. Sono stati ottimizzati emitter innovativi di tipo n a base di ossido di silicio, grazie anche alle competenze acquisite su tale tipo di materiale nelle scorse annualità. Sono stati messi a punto processi di screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto per la realizzazione di griglie metalliche su diversi tipi di TCO. Sebbene dal punto di vista sperimentale le celle ad eterogiunzione finora realizzate non mostrano efficienze maggiori del 16%, obiettivo previsto per questa linea di attività, sono però stati individuati i punti critici e sono stati ottimizzati sia i materiali che i processi per la realizzazione delle varie interfacce. È ragionevole pertanto ritenere di poter ottenere i risultati previsti in termini di efficienza di dispositivo nei prossimi mesi.

Per quanto riguarda lo sviluppo di celle solari a film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS), nel corso delle passate annualità era stato messo a punto un processo per la realizzazione di celle fotovoltaiche in cui il materiale attivo veniva realizzato depositando per evaporazione e-beam i precursori, composti da un multilayer di ZnS, Sn e Cu, che venivano sottoposti successivamente ad un annealing in presenza di zolfo. Con questo processo si era arrivati a un'efficienza del 2,5% e si erano cominciati ad evidenziare problemi di riproducibilità, di segregazione dei solfuri binari (ZnS , SnS_x , Cu_xS) e di disomogeneità composizionale del materiale lungo lo spessore del film. A valle di un'analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si è sviluppato un nuovo processo, in cui i tre solfuri metallici (per esempio ZnS, CuS e SnS) vengono depositati contemporaneamente, in modo che i metalli nei precursori siano distribuiti fin dall'inizio in maniera uniforme e già sostanzialmente solforizzati. L'ottimizzazione del processo di crescita per co-sputtering del CZTS e degli altri strati che compongono il dispositivo ha consentito di ottenere un dispositivo con efficienza massima pari a 5,6%.

Parallelamente è stata investigata una tecnica per la deposizione del CZTS da fase liquida. Uno dei problemi principali riscontrati nella scorsa annualità è stata la scarsa riproducibilità dei materiali, dovuta principalmente a problemi di stabilità delle soluzioni. L'obiettivo principale della ricerca svolta nella presente annualità è stato, quindi, l'ottimizzazione delle soluzioni, in modo da ottenere un buon controllo della stechiometria e della riproducibilità dei film prodotti.

Il progetto si articola in cinque obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe

La cella tandem micromorfa (Figura 123), costituita da una cella anteriore in silicio amorfo ed una posteriore in silicio microcristallino, presenta un'ottima combinazione di gap ottiche dei materiali assorbitori. La ricerca condotta dai più importanti gruppi internazionali del settore per la cella tandem mira nel breve termine ad ottenere il target di efficienza del 14%. In questo contesto s'inserisce la presente linea di ricerca che ha lo scopo di ottimizzare le prestazioni di celle micromorfe mediante lo sviluppo di nuovi materiali e architetture di dispositivo. Le attività di questa annualità hanno riguardato lo sviluppo di strati drogati innovativi di tipo p a base di ossido di silicio con migliori proprietà ottiche rispetto a quelli utilizzati in precedenza. Sono stati poi progettati riflettori posteriori per migliorare l'assorbimento della radiazione solare nel dispositivo e sono state effettuate alcune prove sperimentali per mostrare la possibilità di realizzare le strutture definite mediante l'ausilio del Focused Ion Beam. E' stata, inoltre, valutata la potenzialità di intrappolamento della radiazione solare di substrati nanostrutturati ottenuti mediante processi di erosione ionica auto-organizzata, realizzando su di essi celle solari.

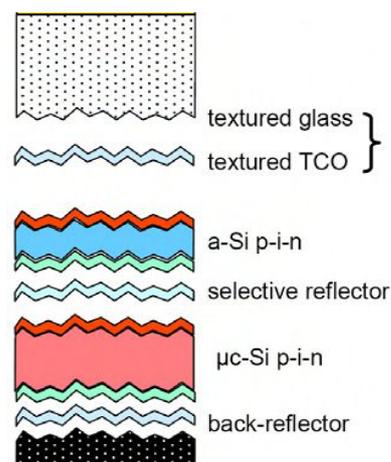


Figura 123. Schema di una cella tandem micromorfa

a.1 Sviluppo di processi di deposizione con tecnica PECVD ad alta frequenza per la realizzazione di film drogati p a base di ossido di silicio

In una cella solare a film sottile di silicio lo strato assorbitore, quello cioè in cui deve avvenire il processo di generazione delle coppie elettrone-lacuna, è costituito dalla strato intrinseco, mentre i fotoni assorbiti nelle regioni drogate non contribuiscono al processo di fotogenerazione. Sarebbe pertanto auspicabile ridurre al minimo le perdite per assorbimento associate agli strati drogati. Particolarmente rilevante risulta la messa a punto dello strato p, in quanto la radiazione solare entra nel dispositivo proprio attraverso tale strato che quindi deve essere il più possibile trasparente ad essa. Per questo motivo lo strato p viene comunemente indicato come *window layer*. La proprietà di alta trasparenza deve essere accompagnata da un'appropriata conducibilità elettrica e le due richieste possono essere tra di loro conflittuali, dato che il drogaggio può influenzare indirettamente altre proprietà del materiale.

In questo contesto s'inserisce lo sviluppo di strati drogati di ossido di silicio microcristallino (SiO_x), materiale costituito da fase mista in cui nanocristalli di silicio sono inglobati in una matrice amorfa di ossido di silicio. Nelle precedenti annualità sono stati sviluppati strati di ossido di silicio drogato n. Essi sono stati utilizzati nella cella micromorfa in sostituzione dello strato convenzionale in silicio microcristallino sia nella giunzione tunnel che nella cella posteriore. Sulla base dei rilevanti risultati ottenuti si è deciso quest'anno di estendere lo studio anche al materiale di tipo p. A tal fine una camera del sistema di deposizione (Figura 124) è stata modificata per dedicarla alla deposizione dei soli film drogati di tipo p. Questo con lo scopo sia di migliorare la riproducibilità delle deposizioni, separando la deposizione dei materiali di tipo p da quella dei film di tipo n, che di sperimentare una diversa tipologia di elettrodo e una diversa frequenza di alimentazione. In particolare, è stato installato un elettrodo forellato.

Con questa modifica i gas utilizzati per la deposizione dei materiali vengono fatti penetrare nella regione in cui avviene la loro decomposizione attraverso i fori dell'elettrodo, garantendo un apporto diretto ed omogeneo di essi su tutta la superficie del substrato che si affaccia all'elettrodo. Questo tipo di distribuzione di gas, quindi, consente in linea di principio di migliorare l'uniformità di deposizione sia in termini di spessore che in termini di struttura sull'intera area del substrato ($10 \times 10 \text{ cm}^2$). L'elettrodo è collegato ad un generatore RF a 40,68 MHz

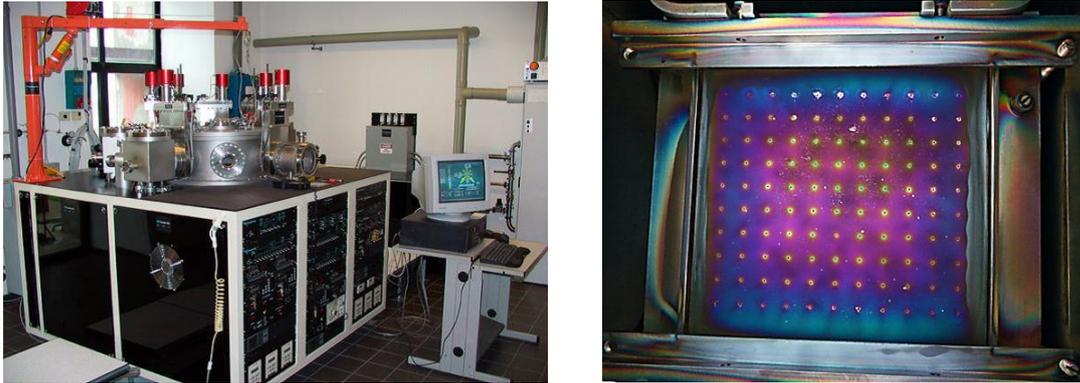


Figura 124. Impianto multicamera utilizzato per la fabbricazione di materiali e celle solari a film sottile ed elettrodo forellato utilizzato nella camera di deposizione dei film di silicio di tipo p

Dopo aver verificato il corretto funzionamento della camera di deposizione in regime di alta frequenza, si è dato inizio all'attività di sperimentazione per la realizzazione di film di ossido di silicio drogati p a fase mista ($p\text{-SiO}_x$). Per ottenere questi materiali alla miscela di gas inizialmente utilizzata è stata aggiunta una sorgente gassosa di atomi di ossigeno, l'anidride carbonica (CO_2). È stata quindi studiata l'influenza del contenuto di ossigeno sulle proprietà strutturali, ottiche ed elettriche, variando il flusso di CO_2 . Sono state fabbricate tre serie di campioni a tre differenti valori della densità di potenza ($55, 100$ e 170 mW/cm^2). Per tutti i campioni, la temperatura del substrato è fissata a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ e la pressione in camera è pari a 1 torr.

Sebbene siano le proprietà elettriche ed ottiche dei materiali a determinarne il loro potenziale utilizzo nei dispositivi, non si può tralasciare la valutazione della velocità di crescita. Tale parametro risulta infatti di interesse industriale perché a valori troppo bassi di velocità di crescita possono corrispondere tempi di processo molto lunghi che possono comportare una drastica riduzione della resa di produzione. Questo problema è particolarmente sentito quando si ha a che fare con la crescita di materiali microcristallini in cui è necessario generalmente modificare i parametri di processo per consentire la crescita di fasi ordinate. Nel caso in esame sono state determinate le velocità di crescita per le tre serie realizzate (Figura 125).

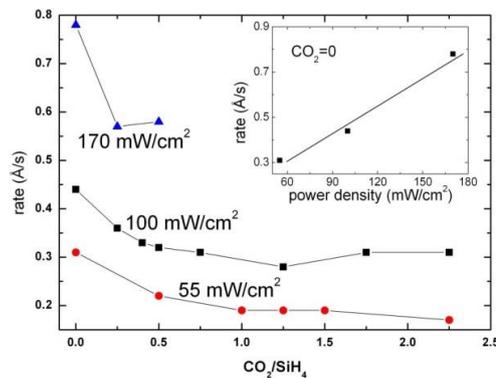


Figura 125. Velocità di deposizione per le tre serie di campioni cresciute a tre differenti densità di potenza

I film mostrano, come ci si attendeva, una forte dipendenza della velocità di crescita dalla potenza del campo eccitante. Come è evidente nell'insero della figura, tale velocità aumenta linearmente con la frequenza nel caso dei film microcristallini standard. Per tutte le serie in esame si è poi osservato che aggiungendo la CO_2 nella miscela si osserva un'iniziale riduzione del rate di crescita oltre il quale essa rimane pressoché costante.

La correlazione tra le proprietà ottiche ed elettriche è cruciale nello sviluppo di un materiale a base di ossido di silicio che possa essere utilizzato in sostituzione del convenzionale strato p in silicio microcristallino nelle celle solari. In particolare, come accennato in precedenza, è necessario che il materiale sia il più trasparente possibile compatibilmente con l'esigenza di un'appropriata

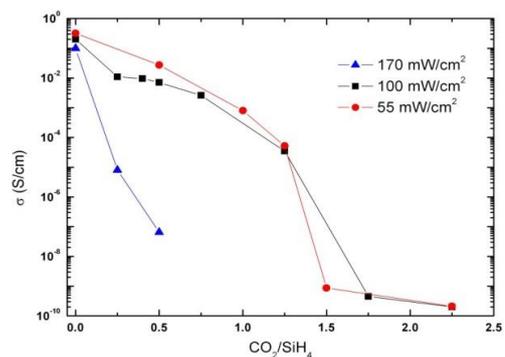


Figura 126. Conduttività elettrica in funzione del rapporto CO_2/SiH_4 per le tre serie di campioni

conducibilità. La Figura 126 riporta l'andamento della conducibilità elettrica per le tre serie di campioni. Aggiungendo CO₂ alla miscela di gas, il materiale inizia a incorporare ossigeno al suo interno e ciò ha come conseguenza una riduzione della conducibilità di vari ordini di grandezza. L'andamento di σ risulta abbastanza simile nel caso delle serie a 55 e 100 mWcm², mentre si osserva una rapida riduzione della conducibilità alla più alta potenza utilizzata in questo studio (170 mW/cm²). Questa differenza di comportamento è presumibilmente legata ad una diversa transizione strutturale del materiale cresciuto utilizzando valori differenti di potenza. Ciò è, infatti confermato dalle misure di spettroscopia Raman effettuate sulle tre serie di campioni. Tali misure mostrano che, come già riscontrato nello studio dei film drogati di tipo n, l'aggiunta di CO₂ comporta un riduzione della frazione cristallina nel materiale fino alla definitiva transizione verso una struttura completamente amorfa. Tuttavia mentre ad alta potenza, a causa della più elevata velocità di deposizione che non favorisce la crescita di fase ordinata, il materiale si presenta amorfo già a bassi valori del flusso di CO₂, negli altri casi la fase cristallina è invece preservata in un ampio intervallo del rapporto CO₂/SiH₄. I regimi a più bassa potenza sono quindi compatibili con la crescita di un materiale a fase mista. Come già osservato per i film di tipo n, è proprio questa fase mista da cui il p-SiO_x è costituito che consente di aggiustare opportunamente le proprietà ottiche grazie alla presenza di ossigeno nella matrice amorfa, mantenendo una conducibilità sufficientemente elevata mediante il drogaggio della fase nanocristallina.

Le proprietà ottiche dei materiali sono state indagate attraverso misure di ellissometria. Il fit dei dati è stato ottenuto utilizzando l'approssimazione del mezzo efficace di Bruggeman, descrivendo il materiale come miscela di silicio in fase nanocristallina e ossido di silicio non stechiometrico. La figura 127 mostra i valori stimati per l'indice di rifrazione n a 635 nm e per E₀₄ (energia alla quale il valore del coefficiente di assorbimento si riduce a 10⁴ cm⁻¹, valore quindi indicativo della gap di energia dei materiali) per le serie più promettenti. Il progressivo aumento di atomi di ossigeno nei film, ottenuto incrementando il rapporto CO₂/SiH₄, ha l'effetto di ridurre l'indice di rifrazione fino a valori inferiori a 2,4 e di allargare la gap del materiale fino a valori di E₀₄ superiori a 2,3 eV. Entrambe le modifiche alle proprietà del materiale possono avere ripercussioni positive sulle prestazioni dei dispositivi: la riduzione dell'indice di rifrazione può infatti determinare una riduzione della perdita per riflessione all'interfaccia tra l'elettrodo frontale (TCO) e il silicio grazie ad un miglior matching degli indici di rifrazione, mentre l'allargamento della gap di energia determina una riduzione delle perdite dovute ad assorbimenti parassiti, assorbimenti cioè che non contribuiscono al processo di fotogenerazione quali sono quelli che avvengono negli strati drogati. Vale la pena notare che le due serie depositate a 55 e 100 mW/cm² mostrano simili proprietà ottiche ed elettriche, cosa che rende più interessante la serie ottenuta a più alta potenza grazie alle maggiori velocità di crescita ottenibili in questo caso.

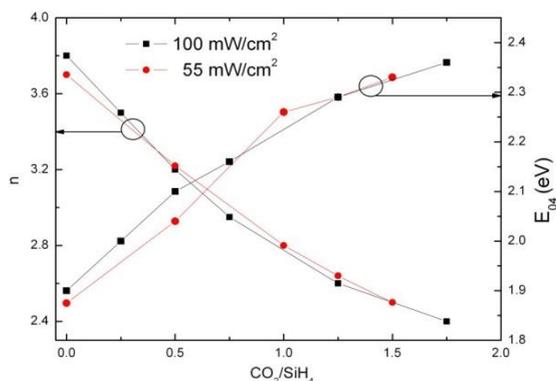


Figura 127. Indice di rifrazione a 635 nm e E₀₄ valutati per le serie cresciute a 55 e 100 mW/cm²

Le interessanti proprietà degli strati di p-SiO_x sono state quindi testate in dispositivi a singola giunzione p-i-n di silicio microcristallino. Sono state fabbricate due celle solari che differivano tra loro solo per lo strato p utilizzato: una cella è stata depositata utilizzando lo strato p in silicio microcristallino, mentre l'altra è stata realizzata con il p-SiO_x. Lo strato di ossido di silicio è stato cresciuto a 100 mW/cm² fissando il rapporto CO₂/SiH₄ a 0,75. Le misure di caratteristica I-V sotto illuminazione in condizioni AM1.5 hanno confermato l'adeguatezza delle proprietà elettriche del nuovo strato p, in quanto sono stati misurati valori simili di resistenza serie e Fill Factor. Nella

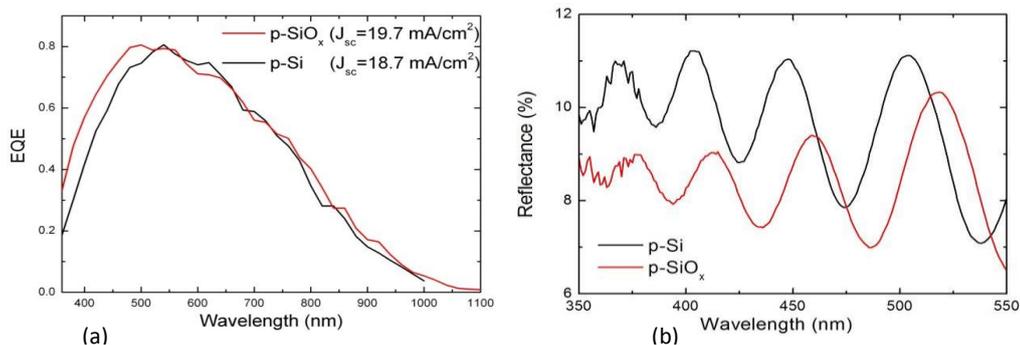


Figura 128. Spettri di efficienza quantica (a) e di riflettanza (b) misurati su dispositivi identici che differiscono per il tipo di strato p utilizzato.

Figura 128a è riportato il confronto tra le misure di efficienza quantica esterna ottenute sui due dispositivi. La figura evidenzia un miglioramento della risposta spettrale nella regione caratterizzata da basse lunghezze d'onda (fino a circa 500 nm), che si traduce in un incremento della corrente di corto circuito pari a 1 mA/cm^2 . Un ulteriore studio del comportamento ottico delle celle è stato eseguito misurando la luce riflessa da esse mediante spettrofotometro (Figura 128b). Da tale misura è stata riscontrata una riduzione della riflessione nel caso della cella ottenuta con il nuovo strato p. Ciò conferma che il miglioramento della corrente ottenuto sul dispositivo è dovuto in parte alla riduzione di assorbimento parassita nello strato p e in parte ad un miglior raccordo degli strati in termini di indici di rifrazione (interfaccia TCO/silicio).

In conclusione si può affermare che è stato sviluppato uno strato innovativo drogato p a base di ossido di silicio microcristallino con caratteristiche ottiche migliori rispetto ai film precedentemente utilizzati. Con questo strato è stato possibile migliorare in termini di corrente di cortocircuito le prestazioni della cella in silicio microcristallino. Nel prossimo futuro il risultato sarà esteso alle giunzioni tandem micromorfe, dove questo strato potrà essere testato sia come strato finestra nella cella top che nella giunzione tunnel del dispositivo. Grazie all'attuale sistema di distribuzione dei gas, sarà inoltre interessante studiare regimi di crescita ad alte pressioni di lavoro (fino a 10 torr) che potrebbero offrire la possibilità di aumentare le velocità di deposizione del materiale, preservandone al contempo le proprietà che lo rendono idoneo per i dispositivi.

Le attività qui sintetizzate sono descritte in maniera più dettagliata nel rapporto RdS/2013/001.

a.2 Nanostrutture auto-organizzate con funzionalità bio-mimetica per fotonica e fotovoltaico

I temi sviluppati in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova hanno riguardato lo studio delle tecniche di nano-strutturazione di substrati metallo-dielettrici allo scopo di modificare la funzionalità ottica dei dispositivi fotovoltaici a film sottile e di conseguire un aumento della raccolta fotonica (photon harvesting). Sono stati adottati trattamenti di nanostrutturazione volti a replicare gli effetti antiriflesso di sistemi bio-mimetici e a realizzare morfologie superficiali con corrugazioni ad elevato rapporto di aspetto e periodicità confrontabili con la lunghezza d'onda della luce in modo da indurre diffusione dei fotoni ad angoli elevati. L'ottimizzazione del processo di nanostrutturazione è stata portata avanti a Genova, mentre in ENEA sono state fabbricate e caratterizzate celle solari a singola giunzione p-i-n in silicio amorfo sui vetri testurizzati. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/2013/002.

Il processo di nanostrutturazione sviluppato a Genova si basa sulla tecnica del bombardamento (o sputtering) da fascio ionico de-foccheggiato (Ion Beam Sputtering - IBS), dapprima formando una maschera metallica (oro) auto-organizzata (stencil) e quindi proiettando le nanostrutture sul substrato di interesse (vetro). Per tale motivo il processo è chiamato Ion Projection Lithography (IPL). E' stata sviluppata una modifica del processo, in cui l'erosione ionica è assistita da una sorgente di codeposizione di atomi (Assisted-Ion Projection Lithography A-IPL) per ottenere nanostrutture di dinamica verticale estesa oltre il valore di 200 nm. La nanostrutturazione del substrato tramite IPL e A-IPL avviene su aree estese (scala del cm^2) in maniera efficiente. Entrambe le versioni del processo risultano inoltre facilmente scalabili verso procedimenti standard di produzione industriale in quanto le apparecchiature utilizzate risultano compatibili con quelle degli impianti utilizzati per la deposizione di film sottili e di coatings ottici.

La morfologia delle nanostrutture è stata ottimizzata al fine di modificare la funzionalità ottica dei substrati. In questo modo si è ottenuta (i) una riduzione dell'intensità luminosa riflessa dall'interfaccia, replicando la morfologia di superfici bio-mimetiche (cornee di alcuni insetti notturni) e (ii) un aumento dell'intensità luminosa diffusa (scattering) ad angoli superiori di quello di incidenza, in modo da massimizzare la funzione di Haze (rapporto tra intensità diffusa e intensità totale riflessa dalla interfaccia). Tramite misure di Microscopia a Forza Atomica (AFM) e misure di riflettanza diffusa e totale è stato possibile evidenziare come le funzionalità ottiche siano strettamente connesse alle caratteristiche morfologiche delle nanostrutture stesse (rugosità RMS e periodicità), determinando le migliori condizioni sperimentali. I substrati funzionalizzati sono stati usati come supporto per la fabbricazione di celle solari a film sottile. Il confronto tra i dispositivi realizzati su substrati nanostrutturati e su vetro liscio ha evidenziato miglioramenti significativi di efficienza quantica esterna alle alte lunghezze d'onda, con conseguente incremento della densità di corrente generata dalla cella.

Si evidenzia inoltre che la maschera stencil formata da nanofili d'oro che si ottiene durante le prime fasi del processo, possiede di per sé caratteristiche fisiche estremamente attraenti. Essa è composta da un array di nanofili di oro la cui bassa resistenza elettrica longitudinale (1 Ohm/sq) e alta trasparenza ottica li rende competitivi con i migliori TCO per la realizzazione di nanoelettrodi trasparenti. In aggiunta, tali nanostrutture supportano risonanze plasmoniche localizzate (LSP) che li rendono interessanti per applicazioni di photon harvesting nel campo fotovoltaico e nella bio-sensoristica.

In parallelo è stata studiata l'applicabilità del processo IPL-IBS con utilizzo di maschere stencil auto-organizzate ottenute a partire da film metallici a basso costo alternativi (e.g. Al, Cu, Mo) e su substrati alternativi di interesse per il fotovoltaico, quali Si e GaAs, verificando che è possibile indurre la funzionalità antiriflesso. I film in Al sono risultati buoni candidati per la formazione di maschere per IPL, a differenza dei film in Mo che presentano una scarsa tendenza a formare nanostrutture quando irraggiati dal fascio ionico. Nel caso del Cu si è invece studiata la possibilità di realizzare matrici bidimensionali di nano cluster per un successivo utilizzo come maschere stencil per il processo IPL. Gli esperimenti risultano promettenti in quanto è stata osservata la formazione di strutture ad elevato rapporto di aspetto che rispondono a tutte le polarizzazioni dei fotoni, con dosi ioniche estremamente ridotte (tempi di irraggiamento di poche decine di secondi).

In modo complementare è stata studiata la possibilità di realizzare matrici di cluster metallici bidimensionali da impiegare successivamente come maschere stencil IPL, ricorrendo alla deposizione attraverso array di nanosfere polimeriche (Nanosphere Lithography). La risposta plasmonica dei nano cluster risulta particolarmente significativa in quanto può essere modificata in modo semplice variando la dose o la taglia delle nanosfere.

Si menzionano infine gli studi preliminari volti alla realizzazione di matrici di nanofili metallici ricorrendo alla tecnica di Litografia ad Interferenza Laser (IL) che è stata messa a punto nel corso del progetto. Come mostrato in Figura 129a, un fascio laser da 405 nm, diffratto da un pinhole con apertura di 50 μm , interferisce dopo un percorso di circa 30 cm con la parte di fascio riflessa da uno specchio (configurazione litografica alla Lloyd - LIL), consentendo la realizzazione di matrici di nanofili di periodicità intorno ai 300 nm su aree dell'ordine del cm^2 (Figura 129b). In vista degli sviluppi futuri il risultato è particolarmente promettente, in quanto consente di realizzare in modo semplice array monodispersi su aree compatibili con le dimensioni caratteristiche dei prototipi di celle fotovoltaiche. Le nanostrutture prodotte nello strato di resist saranno in seguito utilizzate (i) come una maschera sacrificale per trasferire il pattern nel substrato di vetro tramite ad esempio tecniche di Reactive Ion Etching (RIE) o Ion Projection Lithography (IPL); (ii) per il confinamento di nanoparticelle metalliche con proprietà plasmoniche il cui interesse nel campo delle applicazioni fotovoltaiche è di stretta attualità.

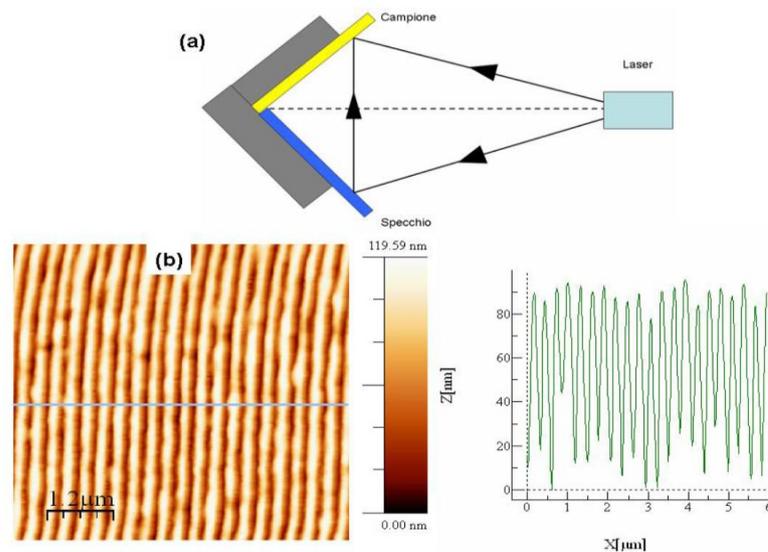


Figura 129. a) Configurazione alla Lloyd del setup di litografia interferenziale; b) reticolo unidimensionale ottenuto dall'esposizione di un film di fotoresist al pattern interferenziale

a.3 Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare

Le attività di ricerca hanno riguardato la progettazione sia numerica che sperimentale di riflettori posteriori per celle solari a film sottile con lo scopo di aumentare l'assorbimento della radiazione solare nel dispositivo. Le attività, svolte nell'ambito di un accordo di collaborazione tra l'ENEA e l'Università del Sannio, si sono sviluppate su due direzioni principali: una teorico/numerica, di studio e progetto delle strutture in esame, l'altra sperimentale, rivolta alle prove di fabbricazione delle strutture e dei dispositivi. Le due attività non sono state condotte in forma indipendente l'una con l'altra; al contrario, le risorse e le competenze teoriche e sperimentali si sono continuamente interfacciate ed integrate fra loro per garantire una proficua collaborazione all'interno del progetto. L'Università del Sannio si è principalmente occupata della progettazione numerica, mentre presso i laboratori dell'ENEA sono state condotte le prove sperimentali che hanno visto il coinvolgimento anche di

personale proveniente dall'Università. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/2013/003.

Per quanto riguarda la progettazione numerica dei riflettori posteriori (back-reflectors), gli studi condotti durante la scorsa annualità avevano già evidenziato che configurazioni aperiodiche (in particolare quelle di tipo reticolo di Fibonacci) fossero in grado di garantire dei miglioramenti in termini di efficienza rispetto alle geometrie più tradizionali di tipo periodico. Le simulazioni numeriche, effettuate in comparazione al caso periodico su una cavità ottica, avevano evidenziato un miglioramento dell'assorbimento dovuto principalmente alla migliore eccitazione di modi guidati propaganti nella regione attiva di silicio, di modi superficiali plasmonici all'interfaccia metallo-dielettrica e ad effetti di tipo Fabry-Perot. Sulla base di ciò, le attività di progetto in quest'ultimo anno sono state rivolte all'applicazione dei risultati già ottenuti a strutture "reali", ossia a configurazioni di celle solari che tenessero in conto dei vincoli reali di fabbricazione, sia in termini di proprietà fisiche dei materiali in gioco, che delle tecniche e dei metodi di fabbricazione utilizzati. Particolare attenzione dunque è stata rivolta alla scelta di tutti i modelli che garantissero la maggiore aderenza al caso reale. La definizione delle specifiche di progetto (materiali utilizzabili, spessori degli strati di cui si compone la cella, caratteristiche delle strutturazioni possibili, ecc.) è stata effettuata in stretta collaborazione tra ENEA e Università del Sannio.

La struttura della cella solare a film sottile analizzata (Figura 130a) è essenzialmente composta da uno strato di ossido conduttivo trasparente (TCO) che costituisce l'elettrodo frontale della cella, dalla giunzione p-i-n e da un contatto metallico posteriore, che funge sia da collettore di cariche che da back-reflector per permettere di recuperare parte della radiazione solare non assorbita al primo passaggio nello strato attivo. Sono state analizzate diverse configurazioni di celle solari (Figura 130b-d), allo scopo di verificare per quale caso la presenza del back-reflector (ossia la microstrutturazione del contatto metallico della cella) garantisca il massimo aumento di efficienza. Il confronto è stato effettuato tenendo conto delle diverse possibili strategie di fabbricazione delle nanostrutture, fissando un approccio di tipo top-down. La prima possibilità consiste nell'effettuare la nano-strutturazione sulla regione di tipo n della giunzione ovvero prima della deposizione finale dello strato metallico che andrà evidentemente a riempire anche i vuoti opportunamente creati durante il processo litografico formando così la struttura metallo dielettrica desiderata (Figura 130b). La seconda possibilità consiste nell'effettuare la nano-strutturazione dopo la deposizione dello strato di silicio amorfo.

In tal caso evidentemente le successive deposizioni avverranno in modo conforme alla precedente nano-strutturazione (Figura 130c). L'ultimo approccio consiste nell'effettuare la nano-strutturazione direttamente sullo strato di TCO, quindi, prima della deposizione conforme degli strati costituenti la giunzione p-i-n e dello strato metallico (Figura 130d). Lo studio numerico ha rivelato come proprio quest'ultima configurazione, e quindi l'introduzione di un reticolo di diffrazione tra il contatto frontale e la regione attiva del dispositivo, può garantire un aumento di efficienza "ottica" (riferita all'assorbimento di luce nella regione attiva della cella) di circa il 20% rispetto ad una configurazione in cui sia assente la strutturazione. La configurazione di Figura 130d permette inoltre di esaltare maggiormente le caratteristiche delle configurazioni aperiodiche che garantiscono un ulteriore 5% di aumento di efficienza in termini di assorbimento rispetto al caso periodico. Gli spettri di assorbimento per le strutture ottimizzate sono riportati nella Figura 131. Una volta determinata la struttura migliore, e quindi stabilita la tecnica di fabbricazione corrispondente, si è proceduto con l'ottimizzazione dei parametri geometrici e dello studio dell'influenza che ha l'angolo di incidenza sull'assorbimento totale. Tale studio ha rivelato che le geometrie aperiodiche (il reticolo di Fibonacci) sono più robuste rispetto a quelle periodiche, garantendo un'alta efficienza anche per alti angoli

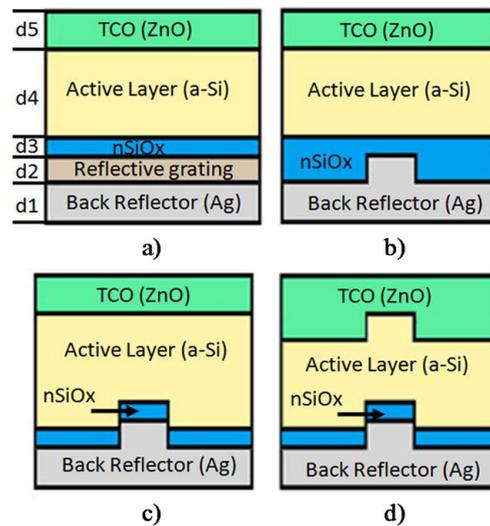


Figura 130. Schematizzazione delle configurazioni di celle solari analizzate

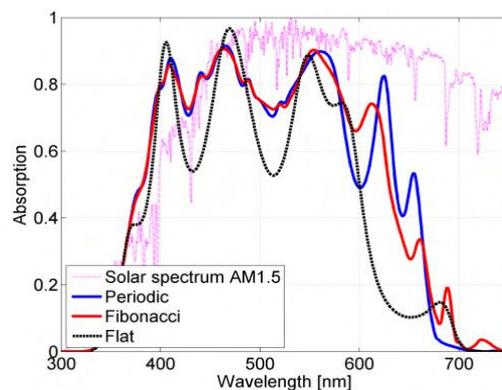


Figura 131. Spettri di assorbimento calcolati per le strutture ottimizzate riferiti al caso flat (assenza di reticolo), periodic (reticolo periodico), e Fibonacci (reticolo aperiodico)

d'incidenza.

Dal punto di vista sperimentale è stato utilizzato un sistema di nanolitografia avanzato quale il Focused Ion Beam (FIB) per eseguire test di nanostrutturazioni sia su film drogati n di ossido di silicio ($n\text{-SiO}_x$), utilizzati come strato n della giunzione, che su strati di ZnO, utilizzati come elettrodo frontale del dispositivo. L'intento è quello di verificare la fattibilità delle diverse strategie di nanostrutturazione proposte in fase di progettazione e riuscire a realizzare dei prototipi di dispositivo.

Per quanto riguarda la nanostrutturazione dello strato di $n\text{-SiO}_x$, fissati i parametri di lavoro già ottimizzati nella precedente annualità, l'attività è continuata correlando la dimensione e il profilo degli scavi con la dose applicata (cioè la corrente totale ionica applicata in un preciso istante). I parametri fissati sono stati: il dwell time $1\mu\text{s}$ (intervallo di tempo in cui il fascio rimane su un singolo punto di scavo prima di muoversi verso il successivo); la direzione dello scavo (ossia il percorso che compie il fascio durante la realizzazione dello scavo) fissata nella direzione "bottom to top" e in modalità "parallel", dove il milling viene effettuato riga per riga per tutta la larghezza del box; il numero di passi (numero di volte che i pixel vengono esposti al fascio ionico), il campo di vista del campione (cioè l'ingrandimento) fissato nel valore più alto possibile. Il fine dell'attività sperimentale è minimizzare il fenomeno della rideposizione, cioè la quantità di atomi rimossi dalla superficie dopo l'urto con gli ioni incidenti e ridepositati sulle pareti dello scavo, per avere un profilo con pareti verticali. La dose stimata per ottenere ciò è pari a 3×10^{17} ioni/cm². Nota la dose e misurato il volume rimosso, è stato possibile calcolare lo sputtering yield (definito come il numero di particelle emesse per ione incidente), risultato pari a 1,6 atomi/ione. Tale valore non è risultato congruente con quello stimato teoricamente tramite un programma di simulazione (TRIM - transport of ions in matter) che aveva previsto un valore pari a 2,7 atomi/ione. Ciò si verifica in quanto il programma TRIM non tiene conto del fenomeno della rideposizione e quindi non è sufficiente a prevedere il reale effetto della nanostrutturazione con il fascio ionico. Dato che la predizione teorica dello sputtering yield è essenziale per realizzare profili molto precisi, una simulazione più adatta potrebbe essere fatta utilizzando, oltre al programma TRIM, altri codici di calcolo capaci di simulare la topografia superficiale includendo anche il fenomeno della rideposizione.

Nella parte finale dell'attività è stata avviata la nanolavorazione di strati di ZnO sulla base degli interessanti risultati mostrati dalle simulazioni numeriche per la configurazione di Figura 130d. È importante sottolineare che, a parte le migliori previsioni teoriche valutate, questa struttura è quella che non dovrebbe avere alcun impatto nel processo di realizzazione della cella in quanto la strutturazione non interrompe il processo di fabbricazione della parte attiva del dispositivo. L'area su cui è stata eseguita la nanolavorazione è pari a $0,5 \text{ cm}^2$. Quest'area è da considerarsi una larga area per quanto riguarda la tecnologia FIB e la sua realizzazione può richiedere tempi molto lunghi che dipendono ovviamente dai parametri geometrici definiti per i canali. Si è deciso in questa fase preliminare di eseguire test che richiedessero tempi brevi di realizzazione, in modo da verificare semplicemente la fattibilità di tutto il processo. Non sono pertanto stati utilizzati i parametri geometrici suggeriti dalle previsioni teoriche, rimandando ad una seconda fase l'esecuzione di tali test. Per ottenere l'array di canali su larga area è stata, quindi, realizzata un'immagine bitmap con canali di ampiezza $5 \mu\text{m}$, distanziati $5 \mu\text{m}$ e lunghezza $0,9 \text{ mm}$. La profondità di scavo è stata fissata a 80 nm . L'immagine è quindi replicata dal FIB e riprodotta sulla superficie del film di ZnO (Figura 132), scavando un'area di $0,8 \text{ mm}^2$ e ricoprendo consecutivamente, grazie alla movimentazione automatica dello stage e del fascio ionico sul campione, l'area totale ($0,5 \text{ cm}^2$). Sul substrato vetro/TCO strutturato è stato realizzato un dispositivo a singola giunzione p-i-n in silicio amorfo. La risposta spettrale della cella solare è stata confrontata con quella misurata su un analogo dispositivo realizzato su una regione flat dello stesso substrato. I parametri elettrici dei due dispositivi valutati dalla misura della caratteristica I-V sono simili e ciò ci consente di dire che il FIB non altera in alcun modo durante il processo di strutturazione le proprietà elettriche del TCO. Le misure di risposta spettrale mostrate in Figura 133 non evidenziano alcun miglioramento sul substrato

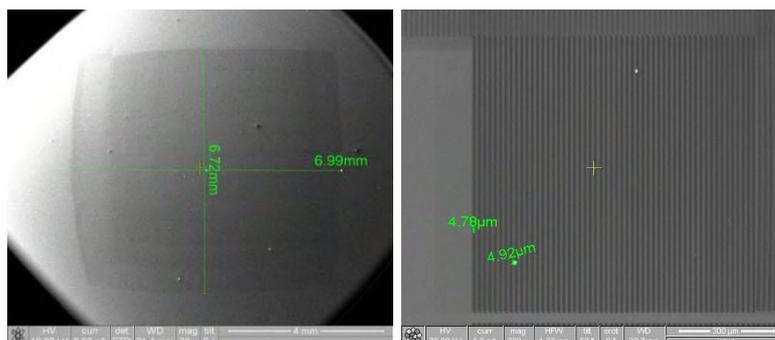


Figura 132. (a) Area totale strutturata al FIB; (b) Dimensioni e larghezza dei canali

strutturato, come ci si poteva attendere dal fatto che le dimensioni dei canali e le distanze tra essi sono ben lontane dalle previsioni teoriche. Avendo tuttavia verificato la fattibilità del processo, si procederà a eseguire i test mirati alla verifica del lavoro di simulazione.

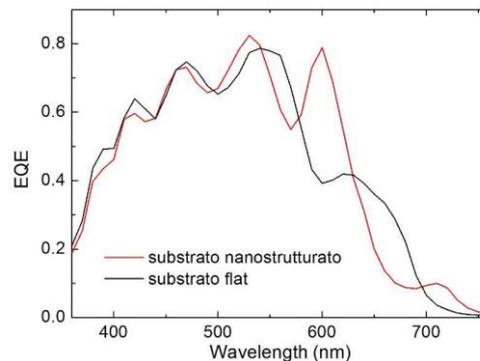


Figura 133. Efficienza quantica esterna misurata sulla cella con ZnO strutturato e flat

In conclusione si può affermare che il lavoro svolto è completamente in linea con gli obiettivi previsti per i dispositivi a film sottile di silicio. Sono state progettate architetture per migliorare l'assorbimento della radiazione solare e sono stati eseguiti test preliminari di realizzazione di celle solari su tali strutture. Sono stati sviluppati film drogati di tipo p a base di ossido di silicio con caratteristiche ottiche migliori rispetto ai film precedentemente utilizzati. Grazie alle competenze acquisite è pensabile estendere le attività allo studio di film di SiO_x di tipo intrinseco da utilizzare come strato assorbitore nei dispositivi. I film a base di ossido di silicio aprono, infatti, interessanti prospettive per lo sviluppo di materiali ad alta gap di energia utili alla realizzazione di celle a tripla giunzione. Si pensa proprio a questo tipo di struttura per poter ottenere moduli a film sottile di silicio con efficienze del 18% nel medio termine.

b. Sviluppo di TCO ad alta efficienza di confinamento ottico per celle a film sottile di silicio

Il confinamento ottico della radiazione solare all'interno di un dispositivo a film sottile è un elemento cruciale per ottenere alte efficienze di conversione con spessori contenuti di materiale attivo. L'intrappolamento della luce all'interno di una cella solare è generalmente ottenuto mediante lo sviluppo di tecniche che si basano sull'utilizzo di un ossido trasparente e conduttivo con una superficie di adeguata rugosità. In alternativa al consolidato utilizzo di TCO naturalmente testurizzati cresciuti con tecnica MOCVD (deposizione chimica da fase vapore da metallorganici), è stato proposto lo sviluppo di superfici di adeguata rugosità direttamente sul vetro. Nel seguito verrà discussa l'attività svolta in questo ambito. Saranno inoltre illustrati i risultati sull'attività di modellazione ottica di TCO testurizzati, attività di primaria importanza per la definizione di superfici che consentano di ottimizzare il confinamento ottico della luce. Verrà infine presentata l'attività sullo sviluppo di TCO con tecniche a basso costo alternative alle attuali.

b.1 Sviluppo di tecniche per il trattamento superficiale di substrati di vetro per l'ottenimento di TCO ad alta efficienza di scattering della luce

In alternativa all'utilizzo di TCO naturalmente testurizzati, la messa a punto di un processo che operi direttamente sul substrato di vetro con la creazione di una superficie di adeguata rugosità consentirebbe due differenti approcci di elevato valore tecnologico: i) poter utilizzare strati di TCO molto sottili fabbricati con tecniche per larga area e di basso costo quali lo sputtering; ii) poter fabbricare strati di TCO a doppia testurizzazione tramite tecnica MOCVD. Relativamente al primo approccio, l'impiego della tecnologia sputtering per la deposizione di TCO su vetro flat non offre la possibilità di realizzare direttamente uno strato testurizzato atto a realizzare dispositivi fotovoltaici a film sottili di silicio con elevate prestazioni. Attualmente, per conferire adeguata rugosità a strati TCO flat prodotti per sputtering, si procede con processi di wet etching che, tuttavia, non sono in grado di assicurare buona uniformità spaziale e sufficiente replicabilità di tipologia di texture. Pertanto, ottenere adeguata ed uniforme rugosità del substrato di vetro su cui viene depositato il TCO mediante sputtering risulta strategico per diffondere la luce incidente e garantirne il massimo assorbimento nel dispositivo.

Diversi metodi di testurizzazione del vetro sono stati proposti e sviluppati in anni recenti per applicazioni nel fotovoltaico a film sottile: etching chimico con acido fluoridrico, deposizione di coating da soluzioni liquide (tramite tecniche sol-gel) contenenti sfere di SiO_2 , sabbiatura, hot-embossing, Aluminium Induced Texture (AIT), etching da plasma o reattivo con o senza litografia. L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di sviluppare

una tecnica per produrre substrati di vetro testurizzati in grado di determinare un efficiente effetto di light-trapping nelle celle fotovoltaiche.

Il metodo AIT, sperimentato da altri gruppi su vetro borosilicato, è stato nella presente sperimentazione applicato su vetro Corning del tipo Eagle XG comunemente impiegato come substrato nei laboratori di ricerca sul fotovoltaico. Il metodo AIT si basa su una reazione chimica attivata termicamente tra il vetro ed un sottile film di alluminio sacrificale depositato per sputtering. Il trattamento termico condotto successivamente ad alta temperatura induce una reazione redox tra l'alluminio ed i silicati del vetro. I prodotti di reazione sono, infine, rimossi mediante etching chimico.

L'attività sperimentale si è sviluppata attraverso più obiettivi sequenziali:

- sviluppo di un vetro testurizzato ed ottimizzazione delle sue caratteristiche di rugosità superficiale
- deposizione di film di TCO sul lato testurizzato del vetro, utilizzando tecniche di deposizione differenti
- realizzazione di dispositivi fotovoltaici a film sottile su tale substrato (TCO/ textured glass).

Il primo obiettivo è stato lo sviluppo di un'adeguata metodologia per l'ottenimento di substrati di vetro Eagle XG testurizzato ed è stata condotta attraverso le seguenti fasi:

1. deposizione di un layer di Al su vetro flat;
2. annealing per indurre la reazione redox;
3. etching chimico per rimuovere i prodotti di reazione;
4. caratterizzazione della superficie risultante.

Un sottile film di Al è stato depositato mediante sputtering in configurazione magnetron planare operante in MF ad una potenza di 3000 W e con spessori tra 100 e 400 nm. I trattamenti termici sono stati condotti in forno a temperature intorno ai 600 °C, sia in aria che in atmosfera controllata di azoto. I prodotti di reazione sono rimossi per etching chimico attraverso due step. Nel primo step si utilizza una soluzione di H₃PO₄ all'85% a 130 °C per 10 min per rimuovere l'allumina anfotera ed i gruppi OH⁻. Nel secondo step, invece, si utilizza una soluzione di HF:HNO₃ in rapporto 1:1, con una durata variabile tra i 15 ed i 35 s in bagno ad ultrasuoni. L'acido fluoridrico attacca i legami Si-O, mentre l'acido nitrico rimuove l'alluminio non reagito.

La caratterizzazione delle superfici testurizzate è stata effettuata mediante spettrofotometria UV-VIS-NIR, SEM ed AFM, al fine di caratterizzarne le proprietà ottiche, la morfologia superficiale e la rugosità. Infine, la diffrazione a raggi-x è stata utilizzata per l'analisi delle fasi.

Le variazioni strutturali verificatesi durante il trattamento AIT sono state analizzate mediante diffrazione ai raggi-x. In figura 134 lo spettro a) si riferisce ad un film di Al depositato su vetro. Sono visibili le riflessioni della struttura cubica dell'alluminio relative ai piani (111), (200) e (220) a $2\theta = 38,5, 44,8$ e $65,2$ rispettivamente. Lo spettro b) mostra i riflessi presenti dopo trattamento di annealing a 610°C/40 min dovuti all'interazione dell'Al con i silicati presenti nel vetro. Si nota la presenza di piccole quantità di Al non reagito, la formazione di silicio cristallino e di piccole quantità di Al₂O₃. Il silicio presenta i riflessi (111), (220), (311) e (400) a valori di $2\theta = 28,5, 47,4, 56,2$ e $69,2$ rispettivamente, mentre tutti i picchi non contrassegnati sono relativi all'Al₂O₃. Questo conferma l'avvenuta reazione redox tra Al e superficie del vetro secondo la reazione: $4Al + 3SiO_2 \rightarrow 2Al_2O_3 + 3Si$.

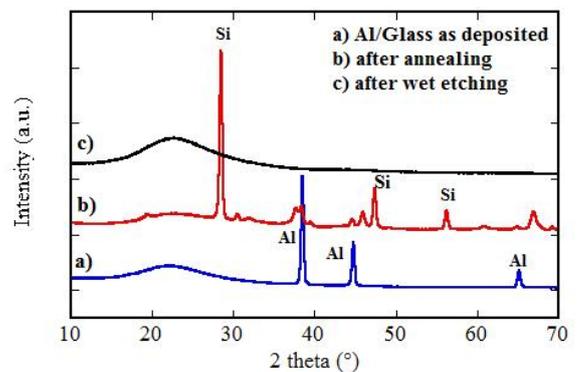


Figura 134. Spettri di diffrazione a raggi-x di un substrato di vetro Corning a) con film di Al, b) dopo annealing in forno e c) dopo attacco chimico

Infine, lo spettro c) si riferisce al substrato dopo rimozione dei prodotti di reazione mediante etching chimico. Lo spettro risultante indica che si è avuta completa rimozione dei prodotti di reazione ed è simile a quello di un substrato di vetro non sottoposto ad alcun trattamento. Questo indica che il processo AIT non induce danni nel substrato di vetro.

E' stato condotto uno studio sistematico sul ruolo dei vari parametri coinvolti nel metodo AIT. I differenti parametri sono stati variati e le analisi risultanti sono state utilizzate per avere una migliore comprensione della correlazione tra i parametri del processo AIT e la risultante tessitura superficiale. In particolare è stata analizzata l'influenza dello spessore del film di Al, della temperatura e durata dell'annealing e dell'atmosfera di reazione (annealing in azoto o aria). E' risultato che una forte influenza sulle caratteristiche delle superfici testurizzate è esercitata da differenti spessori del film di Al, dalla temperatura e dalla durata dell'annealing. Invece misure del fattore di Haze e della rugosità non hanno evidenziato significative differenze di testurizzazione tra la reazione avvenuta in atmosfera di N₂ rispetto a quella avvenuta in aria.

Lo spessore del film di Al è stato variato tra 100 nm e 380 nm. Dall'analisi delle superfici è emerso che spessori di 100 nm sono insufficienti a completare la reazione chimica tra alluminio e vetro per cui sono osservabili zone non reagite. La superficie è formata da concavità (Figura 135a) le cui dimensioni aumentano all'aumentare dello spessore di alluminio, variando da 0,5 a 1,5 μm . A spessori di Al più elevati (380 nm) la reazione diviene fortemente anisotropa, si formano cavità multiple che penetrano in profondità (Figura 135b), dando luogo ad una elevata disuniformità superficiale.

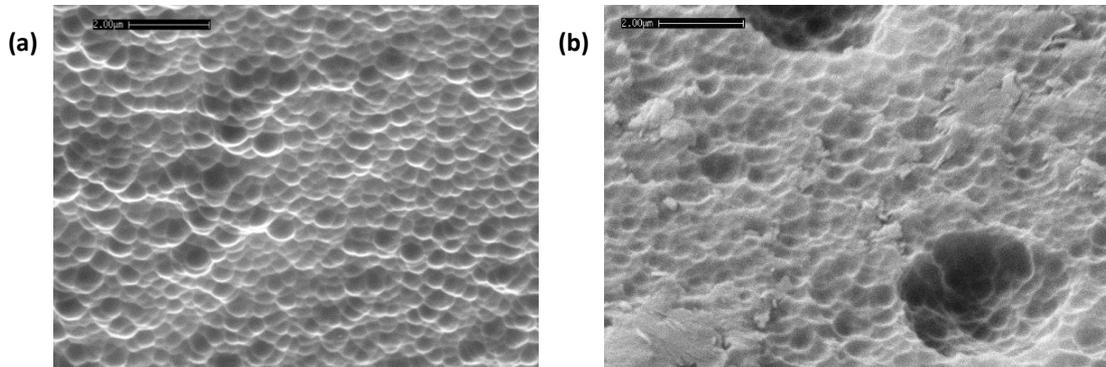


Figura 135. Immagini SEM della morfologia superficiale di vetri testurizzati con tecnica AIT da uno spessore di Al di (a) 200 nm e (b) 380 nm

A parità di condizioni e di tempo di annealing, utilizzando un film di Al di 200 nm è stata variata la temperatura di annealing (T_{ann}) tra 500 e 630 $^{\circ}\text{C}$. Le evidenze sperimentali hanno mostrato che:

- $T_{\text{ann}} < 590^{\circ}\text{C}$ non sono sufficienti ad attivare la reazione redox;
- $590^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{a}} < 605^{\circ}\text{C}$ la reazione è solo parziale;
- $T_{\text{ann}} \geq 605^{\circ}\text{C}$ la testurizzazione è uniforme su scala macroscopica.

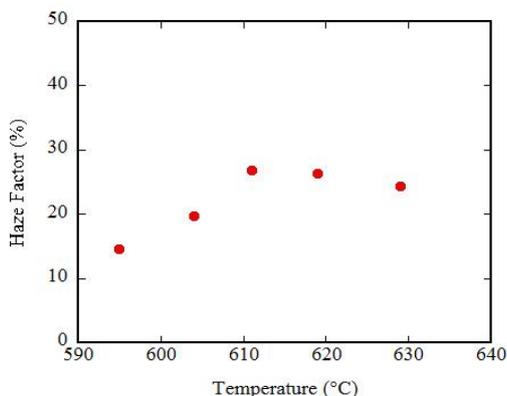


Figura 136. Andamento del fattore di Haze delle superfici di vetro testurizzate al variare della temperatura di annealing

Questo indica che la reazione avviene solo se c'è una sufficiente attivazione termica in grado di rompere il legame Si-O. Inoltre a temperature di annealing più alte, aumentando la diffusività dell'alluminio, si rilevano fenomeni di stress termici (differenti coefficienti di dilatazione termica di vetro ed Al e difetti residui) che inducono una disuniformità di testurizzazione. Un possibile futuro sviluppo potrebbe essere quello di investigare materiali diversi dall'Al con coefficienti di dilatazione termica tali da indurre stress "controllati". In Figura 136 è riportato il fattore di Haze (determinato come rapporto tra la trasmittanza totale e quella diffusa) al variare della temperatura di annealing. Si osserva a 610 $^{\circ}\text{C}$ un miglioramento delle proprietà di scattering della luce. Anche la rugosità (RMS = 80 nm), misurata dalle immagini AFM, risulta più elevata in corrispondenza di questo valore.

Infine, è stata analizzata l'influenza del tempo di annealing che è stato variato tra 20 e 50 minuti. Si osservano due andamenti, il primo fino a 30 min ed il secondo oltre i 40 min. Per lunghi tempi le cavità sono più profonde e la disuniformità degli scavi più accentuata.

Va infine sottolineato che la trasmittanza totale del vetro testurizzato non risulta significativamente modificata rispetto al vetro piano.

Da quanto mostrato si può concludere che trattamenti termici con film di alluminio di spessore di 200 nm e condotti a temperature intorno ai 610 $^{\circ}\text{C}$ per 40 min sono quelli che danno i risultati migliori in termini di uniformità di testurizzazione e tipologia di rugosità superficiale del vetro.

Campioni di vetro trattati con metodo AIT sono stati ricoperti sul lato rugoso con un film di TCO (ZnO:Ga) dello spessore di 700 nm mediante tecnica sputtering. Per la deposizione del TCO sono stati utilizzati vetri di differente rugosità ed è stata comparata l'evoluzione delle proprietà dei layer. La rugosità e l'uniformità dei film di ossido di zinco sono fortemente dipendenti dalla morfologia del vetro sottostante. Ossidi depositati su vetri testurizzati aventi cavità sufficientemente piccole ed uniformi (processo AIT con 200 nm di Al) presentano una rugosità inferiore, minore porosità e sono di spessore più uniforme (Figura 137a). Elevate cavità accentuano la "non-

conformalità" di deposizione tipica dei processi di sputtering e danno luogo a droplets arrotondati con ampie porosità ed elevata rugosità superficiale. Questa seconda morfologia sembra poco adatta all'utilizzo in celle solari. I film di ZnO:Ga depositati su vetri rugosi ottenuti utilizzando Al di 200 nm hanno una sheet resistance di 13 ohm/sq ed una resistività di 9×10^{-4} ohm cm. La trasmittanza è superiore all'80% ed il fattore di Haze ha un valore del 25%. Infine, è stata calcolata una rugosità RMS di 48 nm.

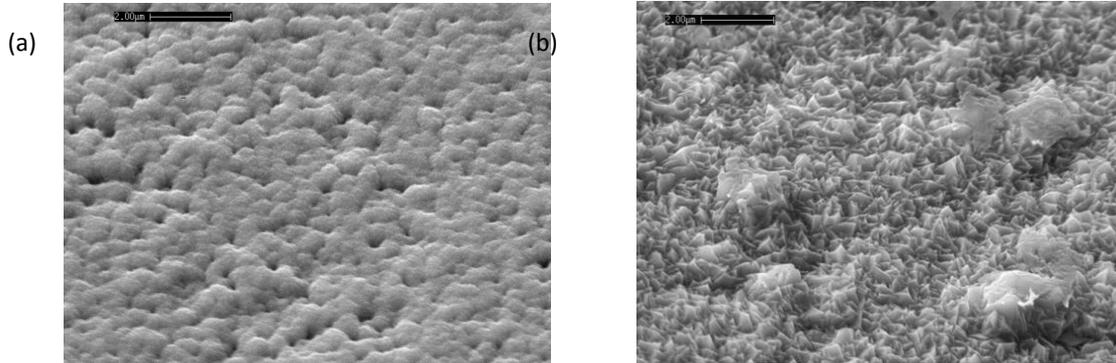


Figura 137. Immagini SEM della morfologia superficiale di un film di ZnO:Ga depositato per sputtering su vetro rugoso (a) e di un film di ZnO:B depositato per MOCVD su vetro rugoso (b).

Su vetro testurizzato tramite processo AIT con 200 nm di Al, sono state effettuate anche alcune deposizioni di ZnO:B mediante tecnica MOCVD. La superficie, come mostrato in Figura 137b, mostra la presenza di poco accentuate strutture a doppia testurizzazione. Per questo TCO abbiamo registrato un deciso incremento della rugosità rispetto a quello depositato su vetro flat (da 58 ad 85 nm). La struttura del vetro è in grado di indurre crescite complesse, ma ulteriore sperimentazione va ancora condotta sia utilizzando substrati più rugosi sia ottimizzando la temperatura di deposizione nel processo MOCVD.

Allo scopo di valutare l'efficacia dei trattamenti condotti sul substrato di vetro e la loro applicabilità in dispositivi a film sottile di silicio, celle solari a singola giunzione p-i-n di silicio amorfo sono state realizzate, utilizzando substrati di vetro testurizzato ricoperti con elettrodo frontale di ZnO:Ga depositato mediante sputtering. Nella Figura 138

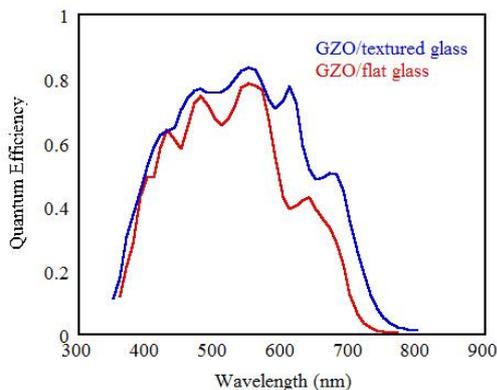


Figura 138. Risposta spettrale misurata su celle di silicio amorfo realizzate su vetro flat e su vetro testurizzato con metodo AIT

sono riportate a confronto le curve di efficienza quantica di un dispositivo realizzato su substrato di vetro con superficie flat e di uno realizzato su substrato di vetro con superficie rugosa ottenuta mediante tecnica AIT. Nella cella realizzata su substrato rugoso si può notare un aumento dell'efficienza spettrale in tutto il range di lunghezza d'onda di interesse ed, in particolare, nella regione rossa dello spettro tra 600 ed 800 nm. La corrente fotogenerata risulta essere di $13,9 \text{ mA/cm}^2$ mentre su vetro flat è di $10,9 \text{ mA/cm}^2$. Questo conferma l'effetto di intrappolamento della luce per effetto del vetro strutturato. Questo risultato è confermato anche dalle riflettanze spettrali condotte sulle celle, le quali mostrano un maggiore assorbimento della radiazione già a partire da 600 nm e per tutto il range delle alte lunghezze d'onda. Questo risultato è molto incoraggiante e va nella direzione aspettata. Tuttavia, ulteriore sperimentazione va ancora condotta per il miglioramento del dispositivo.

Le attività qui sintetizzate sono descritte in maniera più dettagliata nel rapporto Rds/2013/004.

b.2 Modellazione ottica dello scattering di TCO testurizzati

L'attività di modellazione ottica di TCO testurizzati, svolta dall'Università di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Elettronica - nell'ambito di un accordo di collaborazione, ha previsto due linee di attività principali:

1. Definizione di un metodo analitico-sperimentale per la determinazione dell'indice di rifrazione complesso di ossidi trasparenti e conduttivi per applicazioni fotovoltaiche, attività svolta in forma congiunta ENEA-Università

- Definizione di modelli numerici bidimensionali e tridimensionali per la valutazione della fotogenerazione in celle solari a film sottile sulla cui superficie sia presente un TCO di caratteristiche ottiche e geometriche assegnate.

Scopo della prima linea di attività era quello di implementare una procedura per l'estrazione dell'indice di rifrazione che fosse più semplice e nel contempo più affidabile di quelle che si trovano nei programmi commerciali che offrono questa funzionalità. La tecnica sviluppata consiste nel costruire, per un'assegnata struttura multilayer, le superfici che rappresentano, al variare dell'angolo di incidenza, i valori di trasmittanza compatibili con tutti i possibili valori dell'indice di rifrazione complesso. Queste superfici, intersecate con i corrispondenti valori sperimentali di trasmittanza, consentono di ricavare insiemi sempre più ristretti di indici di rifrazione compatibili con gli esperimenti, fino a giungere, se sono disponibili un numero sufficiente di misure indipendenti, alla determinazione univoca dell'indice di rifrazione reale e del coefficiente di assorbimento in funzione della lunghezza d'onda. A titolo di esempio la Figura 139 mostra tre superfici di trasmittanza per 4 angoli di incidenza in polarizzazione p (0°, 15°, 45°, 60°) ottenute in una struttura formata da ZnO depositato su vetro. La stessa figura mostra la proiezione delle curve di livello che si ottengono intersecando le superfici per valori fissati di trasmittanza. Utilizzando valori di trasmittanza sperimentali si possono definire gli intervalli di n e k compatibili con tali valori. Questa procedura è illustrata nella Figura 140 che si riferisce alla lunghezza d'onda pari a 700 nm e ai valori di trasmittanza in corrispondenza dei 4 angoli citati in precedenza misurati sperimentalmente.

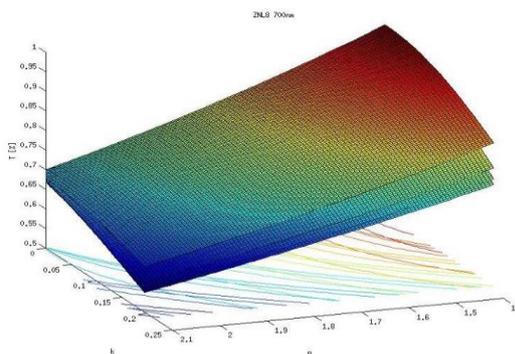


Figura 139. Superfici di trasmittanza per 4 angoli di incidenza in polarizzazione p ottenute in una struttura formata da ZnO depositato su vetro

Le due linee corrispondenti ad ogni angolo definiscono la regione di n e k compatibile con un errore del 1% rispetto al valore misurato. Come si può vedere esiste un'unica regione (evidenziata in blu) di coppie n,k in grado di restituire contemporaneamente tutti e 4 i valori di trasmittanza sperimentali. Ripetendo la procedura per tutte le lunghezza d'onda di interesse è possibile ricostruire i profili di n e k. A titolo di esempio la Figura 141 mostra il confronto tra i risultati ottenuti dall'Università di Napoli con la procedura descritta per un campione (ZNL8) caratterizzato nei laboratori dell'ENEA ed i profili n e k dello stesso campione e del campione C25 così come ottenuti da ENEA mediante procedura ellissometrica. Come si può osservare esiste una consistente discrepanza. Va però ribadito che i valori estratti dall'Università sono gli unici che descrivono la trasmittanza al variare dell'angolo di incidenza.

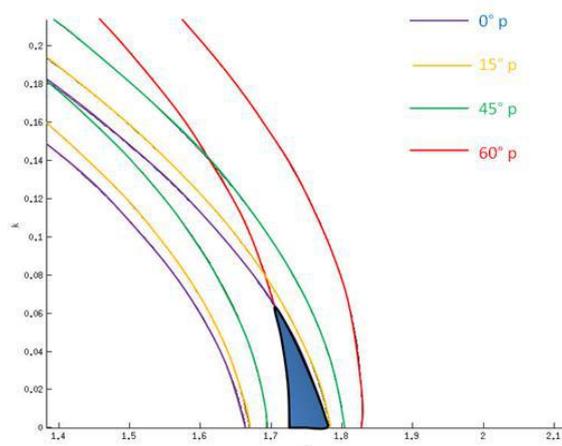


Figura 140. Range di n e k compatibili con i valori di trasmittanza sperimentali

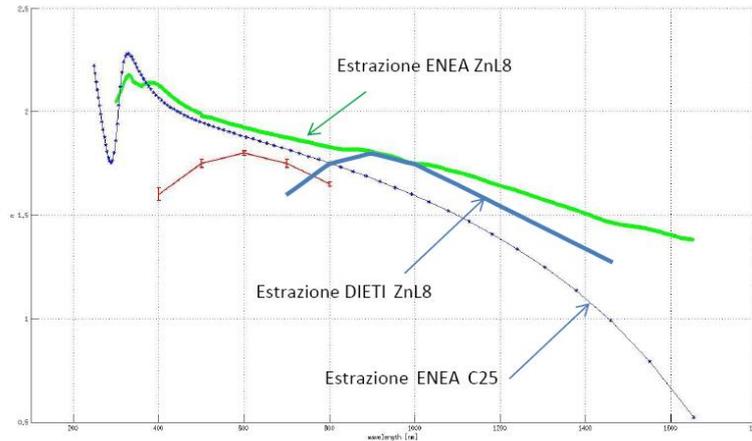


Figura 141. Comparazione tra spettri sperimentali ellissometrici dell'indice di rifrazione dello ZnO e valori ottenuti tramite estrazione effettuata dall'Università

Propedeutica alla fase precedente è stato lo sviluppo di software dedicati, implementati in ambiente MATLAB, per la soluzione delle equazioni che descrivono la propagazione della luce in strutture multistrato.

In particolare si è scelto di utilizzare il modello TMM (Transfer Matrix Method) per la semplicità con cui può essere esteso a strutture composte da un qualsivoglia numero di layer con proprietà ottiche assegnate. Il limite di questo modello, come di tutti i modelli analitici, risiede nell'applicabilità a sole strutture con superfici flat; per ovviare a questa circostanza è uso comune correggere i risultati mediante un coefficiente che tiene conto in maniera empirica della rugosità della superficie. Questo tipo di approccio raramente risulta soddisfacente. Per risolvere questo problema la procedura analitica è stata sostituita da una procedura numerica realizzata in ambiente Sentaurus TCAD. In questo ambiente è possibile risolvere le equazioni dei semiconduttori nelle tre dimensioni, tenendo quindi conto della effettiva geometria superficiale dei dispositivi da analizzare. L'implementazione della procedura è risultata molto complessa a causa della accentuata rugosità dei TCO realizzati; ciò comportava l'utilizzo di griglie di simulazione molto fitte con un numero di punti di discretizzazione tali da portare a divergere i tempi di calcolo. Il problema è stato risolto implementando una procedura automatizzata che ricerca, su una superficie data, l'area minima che conserva i parametri statistici di rugosità della superficie originaria, in modo da poter limitare la simulazione soltanto a tale area. Sempre allo scopo di fornire uno strumento di agevole utilizzo, sono state implementate ulteriori procedure che consentono di produrre automaticamente la sequenza di comandi Sentaurus a partire dai dati numerici che rappresentano l'immagine AFM della superficie da analizzare. La Figura 142 mostra l'immagine AFM originaria (visualizzata in MATLAB) e la corrispondente discretizzazione Sentaurus ottenuta tramite tale procedura.

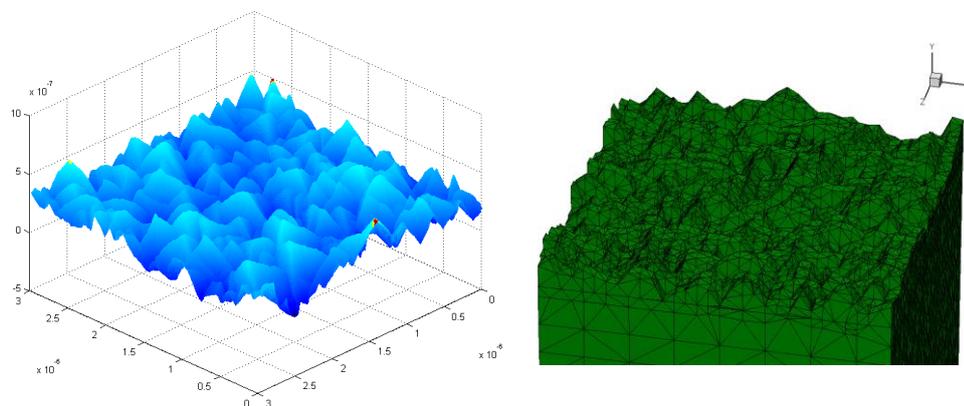


Figura 142. Immagine AFM di una superficie di TCO rugoso (visualizzata in MATLAB) e la corrispondente discretizzazione Sentaurus

Un ulteriore punto che è stato necessario affrontare ha riguardato la scelta del modello più appropriato per la descrizione della propagazione della luce. L'ambiente Sentaurus mette a disposizione tre possibili alternative, il modello TMM, il raytracing (modello geometrico) ed il modello EMW (Electro Magnetic Wave), quest'ultimo risolve in maniera esatta le equazioni di Maxwell. Sulle superfici piane i tre modelli sono equivalenti ma sulle

superfici rugose possono essere applicate solo il raytracing e l'EMW; il primo di questi, però, perde di validità quando la dimensione delle piramidi che descrivono la rugosità diviene dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce che si propaga. La taratura dei vari modelli ha consentito di ricavare le superfici di trasmittanza di una struttura descritta nelle sue reali geometrie.

Una volta risolto il problema della propagazione, l'ambiente Sentaurus consente di ricavare l'andamento della potenza assorbita (proporzionale alla variazione del flusso di fotoni nei diversi strati della struttura TCO+vetro) nel TCO per ogni specifica lunghezza d'onda. A titolo di esempio nella Figura 143 è mostrato il risultato per $\lambda=712$ nm. Come si può notare l'andamento della potenza assorbita nel TCO riflette la grande disuniformità della superficie. Da questo parametro si può determinare la fotogenerazione lungo i diversi layer che compongono la struttura analizzata. Risolto il calcolo della fotogenerazione è, infine possibile, ricavare le caratteristiche tensione corrente ed i parametri di efficienza di una cella solare a film sottile di struttura assegnata.

Le attività qui sintetizzate sono descritte in maniera più dettagliata nel rapporto RdS/2013/005.

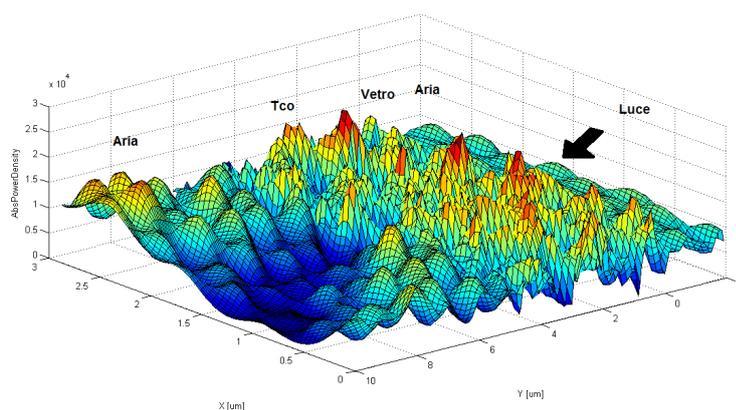


Figura 143. Potenza assorbita nei diversi strati della struttura TCO/vetro

b.3 Analisi delle proprietà di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO prodotti per sol-gel

L'attività sulla preparazione via sol-gel di film sottili di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ossido di zinco (ZnO) con caratteristiche ottiche, morfologiche ed elettriche simili analoghe a quelle ottenute con tecniche da vuoto è stata svolta dall'Università di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale. Le attività qui sintetizzate sono descritte in maniera più dettagliata nel rapporto RdS/2013/006.

Il lavoro svolto evidenzia l'importanza del controllo del pH del mezzo di reazione in questa sintesi sol-gel. La procedura di preparazione di film di ZnO, sia non drogati che drogati con B o Al, è stata dettagliatamente studiata con particolare riferimento all'influenza del pH del mezzo di reazione su alcune specifiche caratteristiche dei film quali lo spessore, la morfologia, il livello di drogaggio e le proprietà ottiche.

A partire da soluzioni molto concentrate di zinco acetato di-idrato in etanolo caratterizzate da una concentrazione di Zn^{2+} pari a 1,0 M ed utilizzando come agente complessante la trietanolamina, si è esplorato un intervallo di valori di pH in campo basico compreso tra 7,66 e 8,76, mantenendo costante il rapporto molare tra precursore dello zinco e agente complessante.

Utilizzando substrati vetrosi, sono stati ottenuti film trasparenti ed altamente omogenei contraddistinti da uno spessore maggiore, da porosità e da un grado di cristallinità più elevato all'aumentare del pH del mezzo di reazione (Figura 144).

La morfologia dei film varia sia con il pH sia con il livello di drogaggio. I film non drogati, infatti, esibiscono una microstruttura di tipo granulare; mentre quelli drogati, a parità di pH, esibiscono una tessitura degli aggregati nanocristallini più fine caratterizzata da una porosità più bassa rispetto a quella dei film non drogati (Figura 145).

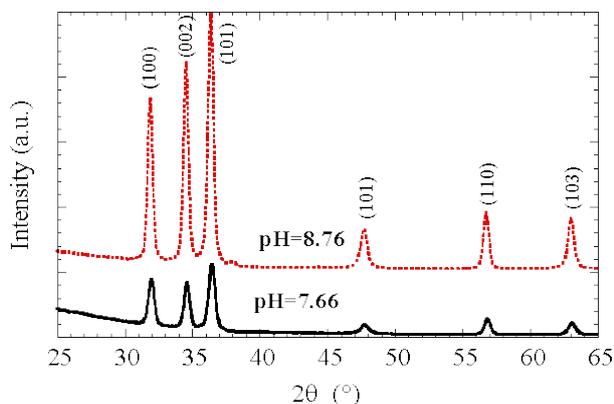


Figura 144. Spettri di diffrazione GIXRD dei film di ZnO a 8 strati ottenuti da soluzioni-scorta a pH=7,66 e pH=8,76

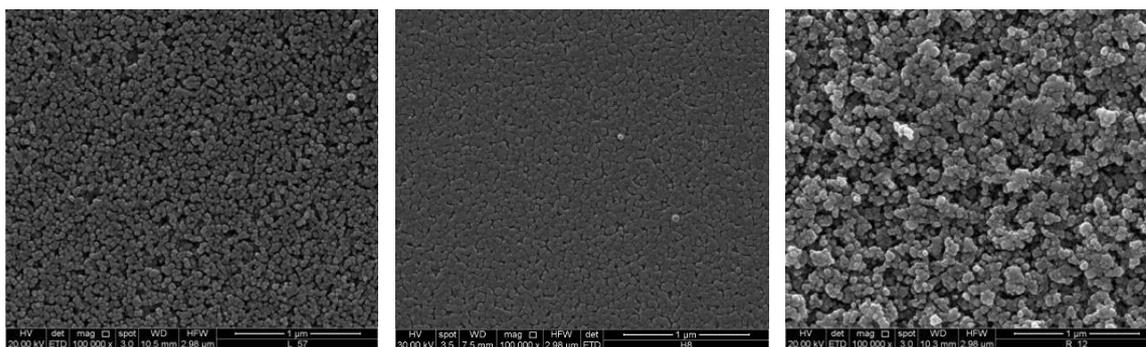


Figura 145. Immagini SEM delle superfici di film a 8 strati ottenuti da soluzioni-scorta a pH=8,76. Sinistra: ZnO; centro: ZnO:B (0,8% in atomi); destra: ZnO:Al (0,8% in atomi)

Per migliorare la conducibilità elettrica, tutti i film preparati sono stati sottoposti ad un pre-trattamento termico a 450 °C per 2 ore in un atmosfera riducente di forming gas, una miscela di azoto ed idrogeno in cui il contenuto di H₂ è pari al 3% in volume. I valori della resistenza di strato sia dei film non drogati che di quelli drogati con B o Al diminuisce all'aumentare del pH della soluzione-scorta da cui sono stati ottenuti (Figura 146).

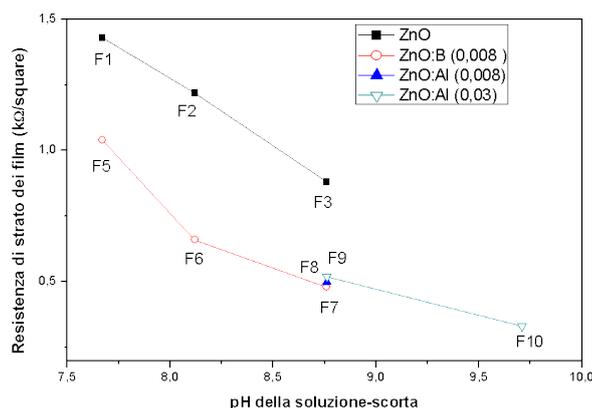


Figura 146. Andamento dei valori della resistenza di strato dei film a 8 strati di ZnO non drogati e di quelli drogati ZnO:B (0,8 % in atomi), ZnO:Al (0,8 % in atomi), e ZnO:Al (3 % in atomi), in funzione dei valori di pH delle soluzioni-scorta da cui sono stati ottenuti

A parità di pH, la resistenza di strato dei film drogati risulta più bassa di quella dei film non drogati indicando che si realizza un parziale drogaggio di tipo sostituzionale, anche se i dati cristallografici supportano l'esistenza di un prevalente drogaggio di tipo interstiziale. Questo risultato è da attribuire principalmente alla bassa temperatura di cristallizzazione generalmente utilizzata con questa tecnica di sintesi. Infatti dopo la procedura di essiccazione si ottengono film amorfi che poi cristallizzano mediante riscaldamento in aria a 600 °C per 30 min. Di conseguenza il processo di cristallizzazione dell'ossido è caratterizzato principalmente da trasformazioni di tipo displasivo, e non di tipo diffusivo, rendendo così più difficile la diffusione dello ione drogante all'interno del reticolo cristallino, e quindi il drogaggio sostituzionale. Pertanto una qualsiasi strategia per migliorare la conducibilità elettrica dei film ottenuti da sol-gel richiede l'ottimizzazione dei parametri di processo che influenzano la chimica della soluzione, tra cui il pH del mezzo di reazione, al fine di realizzare la più efficace dispersione possibile dello ione drogante, al limite su scala atomica.

Pertanto si è avviata una nuova sperimentazione variando la procedura di preparazione della soluzione-scorta con l'introduzione di uno stadio in cui la soluzione dei precursori viene riscaldata a 80 °C per 3 ore a riflusso. I risultati finora raccolti indicano che i film ottenuti da questa procedura continuano a conservare buone caratteristiche morfologiche e presentano una crescita colonnare più marcata rispetto ai film ottenuti precedentemente, a parità di pH della soluzione scorta.

In conclusione si può affermare che il lavoro svolto è in linea con le previsioni iniziali relativamente all'obiettivo b. E' stata avviata una promettente attività sulla realizzazione di substrati testurizzati mediante tecnica Aluminium

Induced Texture. La struttura superficiale del vetro che è stata sviluppata, anche se ancora da perfezionare, si è rivelata idonea per produrre efficace scattering della luce nei dispositivi fotovoltaici a film sottile. Il suo consolidamento in termini di applicazione industriale, con caratteristiche di larga area e basso costo, consentirebbe una significativa innovazione nel campo della produzione e commercializzazione di elettrodi frontali ad alta efficacia di scattering ottico da utilizzare in qualità di substrati nell'industria del fotovoltaico a film sottile. Si è dato inizio anche ad un lavoro di modelling ottico dello scattering di TCO testurizzati, in modo da avere un supporto fondamentale nel processo di ottimizzazione dell'intrappolamento della luce. E' continuata poi l'attività sullo sviluppo di film di ZnO con tecnica sol-gel. Una nuova procedura di sintesi con trattamento termico dei reagenti è stata avviata e sembra promettente per superare i limiti riscontrati sulla possibilità di drogaggio del materiale così cresciuto.

c. Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino

L'attività ha l'obiettivo di realizzare celle solari a eterogiunzione in silicio (Figura 147), utilizzando wafer sottili. Nel seguito vengono analizzati in dettaglio gli elementi critici costituenti tale struttura che attualmente limitano l'efficienza del dispositivo. Su di essi è stato eseguito un lavoro di ottimizzazione presso ENEA che si è anche avvalsa della collaborazione esterna del Dipartimento di Ingegneria Informatica, Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università di Roma "Sapienza". In particolare l'Università ha curato la parte di deposizione di film sottili di ITO e la parte di simulazione dei dispositivi.

Sono stati analizzati i seguenti punti:

1. il contatto fra TCO ed eterogiunzione: ITO vs AZO
2. lo sviluppo di un TCO innovativo a multistrato AZO/Ag/AZO
3. la griglia di raccolta frontale ed il contatto con il TCO
4. il riflettore posteriore
5. la testurizzazione del silicio cristallino
6. difetti di interfaccia a-Si:H/c-Si
7. emitter innovativo realizzato con n-SiO_x

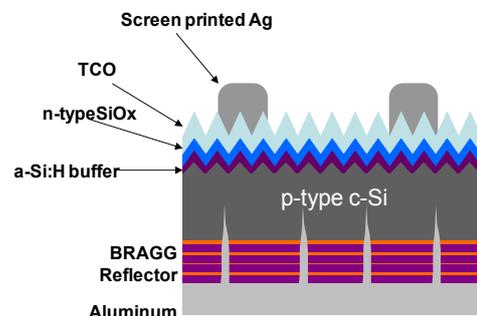


Figura 147. Schema della sezione della cella solare ad eterogiunzione di silicio in esame

Nel seguito vengono descritti sinteticamente i vari punti. Un approfondimento delle varie tematiche è riportato nei rapporti RdS/2013/007, 008 e 009.

1. Il contatto fra TCO ed eterogiunzione: ITO vs AZO

La conducibilità degli strati amorfi di a-Si:H oppure SiO_x drogati n utilizzati per realizzare l'eterogiunzione non garantisce una conduzione laterale efficace dei portatori generati nella cella. Questo si traduce in un'elevata resistenza serie e, quindi, una bassa efficienza. E' necessario pertanto utilizzare uno strato di TCO per garantire un trasporto di carica efficace verso l'elettrodo frontale della cella. Due differenti tipi di TCO sono stati presi in considerazione: *Indium Tin Oxide* (ITO) e *Al doped ZnO* (AZO). Le loro proprietà elettriche ed ottiche sono state analizzate e confrontate per valutare quale fosse il migliore TCO per la struttura di cella solare proposta. Lo strato di ITO è stato realizzato mediante RF Magnetron Sputtering. Lo spessore scelto è stato fissato a 70 nm al fine di ottenere un efficace antiriflesso sulla cella. In Figura 148a e 148b sono riportate rispettivamente la resistività del film di ITO dello spessore di 70 nm e la sua trasmittanza efficace (T_{eff}) pesata sullo spettro solare, in funzione della

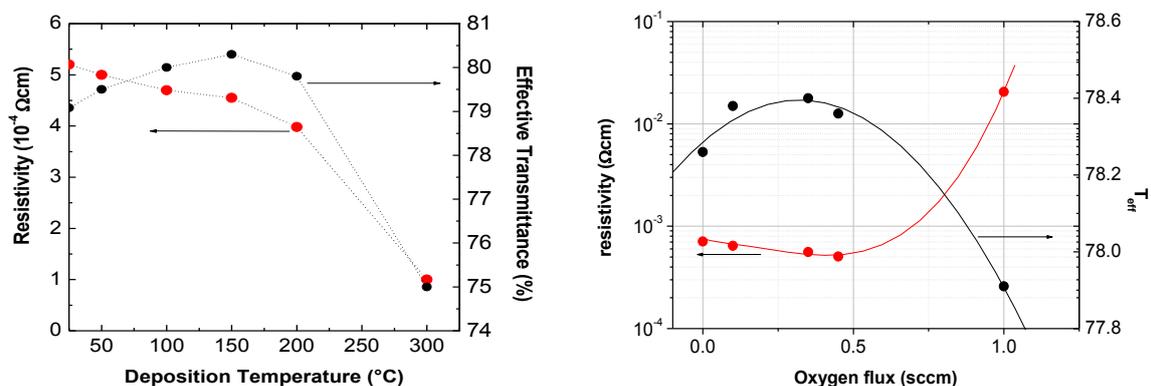


Figura 148. Resistività e trasmittanza efficace dello strato di 70 nm di ITO in funzione della temperatura di deposizione (a) e del flusso di ossigeno nelle camera di reazione (b)

temperatura di deposizione e della quantità di ossigeno introdotta nella camera di reazione durante la deposizione. Dalle analisi riportate è evidente che un aumento di temperatura di deposizione provoca una riduzione della resistività dello strato, ma anche una minore trasparenza. L'introduzione di ossigeno, seppure minima di 1 sccm, riduce fortemente la trasmittanza efficace e aumenta la resistività dello strato di ITO. Quest'ultimo risultato ha suggerito di evitare del tutto l'introduzione di ossigeno in camera di reazione. Una proprietà molto importante dello strato di ITO per la sua applicazione alle celle ad eterogiunzione è la sua *workfunction* (Φ_{TCO}). Per valutare questa proprietà sono state realizzate delle strutture composte da ITO depositato su wafer di c-Si di tipo n. Mediante misure C-V è possibile risalire al valore di altezza di barriera (ϕ_b) che si instaura fra ITO e c-Si. Da questi valori, conoscendo l'affinità elettronica del c-Si ($\chi = 4,05$ eV) e l'energia di attivazione ($E_{\text{att}} = 0,2$ eV) del drogante di tipo n nel c-Si da $1 \Omega\text{cm}$ di resistività, è possibile risalire al valore di Φ_{TCO} dello strato di ITO. In Figura 149 sono mostrate le Φ_{TCO} degli strati di ITO al variare della temperatura di deposizione.

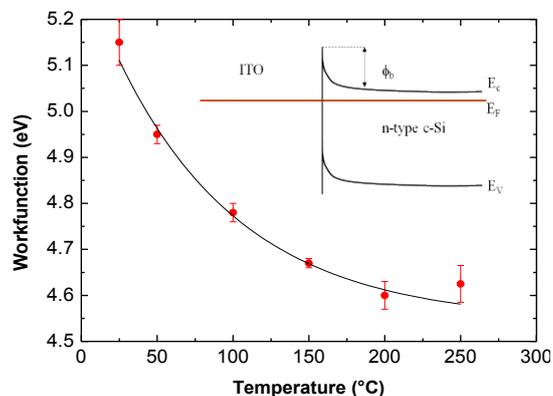


Figura 149. Workfunction dell'ITO in funzione della temperatura di deposizione

Anche lo strato di AZO è stato realizzato mediante tecnica di RF magnetron sputtering e la sua resistività si limita purtroppo a valori di $2 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$. D'altra parte la trasparenza del film di AZO da 70 nm risulta migliore rispetto ad uno spessore analogo di ITO come evidenziato dal confronto di trasmittanze fra ITO ed AZO nell'intervallo spettrale di interesse per il silicio, riportato in Figura 150. Dovendo applicare lo strato di TCO come contatto frontale della cella ad eterogiunzione, si può affermare che un film di AZO dovrebbe essere preferibile per via della migliore trasparenza in grado di garantire una corrente di cella J_{sc} maggiore, ma un film di ITO garantirebbe una maggiore conducibilità e quindi un FF di cella più elevato. La Φ_{AZO} tende ad assumere un valore minore rispetto allo strato di ITO. In letteratura sono infatti riportati valori prossimi a 4,2eV per un film fortemente drogato di AZO mentre dalle nostre analisi risulta un valore di 4,4eV.

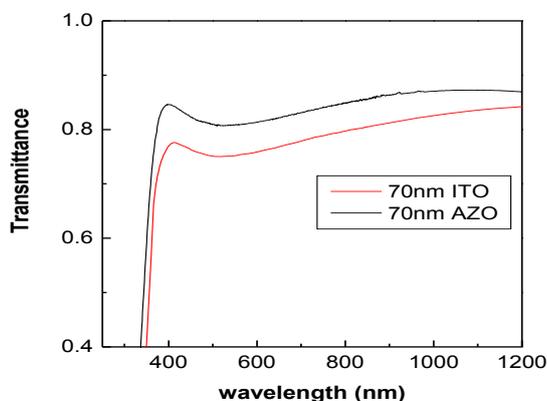


Figura 150. Confronto tra la trasmittanza di film di ITO e AZO di spessore pari a 70 nm

Essendo lo strato di TCO decisamente più conduttivo dello strato amorfo sottostante, esso tende ad imporre l'equilibrio energetico dei portatori in transito (livello di Fermi) intorno alla propria Φ_{TCO} . Lo strato amorfo, essendo molto sottile, può svuotarsi di portatori risultando ancora meno conduttivo. La diretta conseguenza di ciò è la riduzione della tensione di *built-in*. Ciò comporta una perdita di efficienza della cella solare in quanto la V_{oc} della cella stessa è direttamente proporzionale alla tensione di *built-in*. Nelle Figure 151 si riportano i dettagli delle simulazioni numeriche del piegamento delle distribuzioni delle bande energetiche dei contatti frontali della cella nel caso di ITO (Figura 151a) e di AZO (Figura 151b) semplicemente variandone la Φ_{TCO} dello strato. Dal confronto delle simulazioni è evidente che la struttura con AZO costringe il livello di Fermi nello strato SiO_x verso la banda di conduzione, riducendone lo svuotamento di strato ed al contempo permette allo stesso livello di Fermi di attraversare la eterogiunzione in posizione energeticamente più alta all'interno della gap, riducendo così la probabilità di ricombinazione all'interfaccia a-Si:H/c-Si. In Figura 152 sono riportate le simulazioni numeriche delle caratteristiche corrente-tensione (I-V), in condizioni di illuminamento AM1.5G, del dispositivo al variare del valore della Φ_{TCO} fra 4,1eV e 4,6eV.

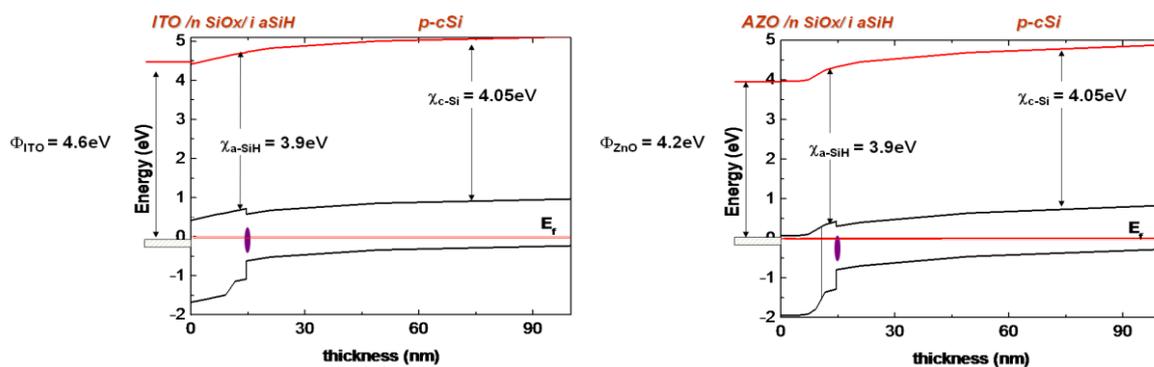


Figura 151. Simulazione numerica del piegamento delle bande energetiche del contatto frontale della struttura in Figura 147 nel caso di ITO (a) e AZO (b)

Appare evidente che all'aumentare della Φ_{TCO} si ha un peggioramento della caratteristica I-V, fino alla comparsa di una "S shape" nella caratteristica stessa. Questo effetto è dovuto alla posizione che assume il livello di Fermi all'interfaccia fra TCO e n-SiO_x. Se la Φ_{TCO} vale 4,6eV, come nel caso dell'ITO, lo strato di n-SiO_x si svuota e, di conseguenza, l'offset di banda di conduzione fra i due materiali n-SiO_x e p-c-Si diventa una barriera che si oppone al passaggio di elettroni. Si può quindi concludere che maggiore è la Φ_{TCO} , peggiore sarà l'efficienza della cella solare. Lo strato di AZO sarebbe quindi preferibile allo strato di ITO. Inoltre abbiamo visto dalla Figura 149 che per ottenere un film di ITO a bassa Φ_{TCO} dobbiamo aumentare la temperatura di deposizione del film stesso. Però questo incremento di temperatura può essere molto critico oltre i 200°C per i film amorfi sottostanti che potrebbero degradarsi completamente dal momento che vengono comunque realizzati a temperature inferiori ai 200°C.

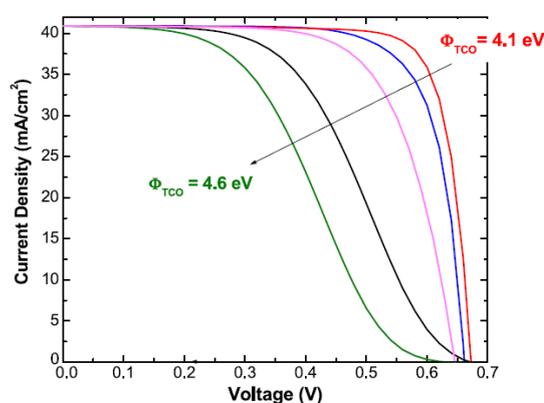


Figura 152. Simulazioni numeriche delle caratteristiche I-V in condizione di illuminamento AM1.5G al variare del valore della workfunction dello strato di TCO fra 4,1eV e 4,6eV

2. Sviluppo di un TCO innovativo a base di un multistrato AZO/Ag/AZO

Da quanto detto in precedenza emerge che l'AZO presenta una workfunction e una trasmittanza che lo rendono più appetibile rispetto all'ITO per la definizione di un appropriato TCO per le celle a eterogiunzione. Tuttavia lo spessore di TCO (tipicamente ~70 nm) utilizzato nel dispositivo può limitarne le sue caratteristiche elettriche nel caso in cui sia utilizzato un film piuttosto resistivo. Tale spessore è scelto in modo da ottimizzare la proprietà antiriflesso sulla cella, ma sarebbe, al contempo, preferibile uno spessore maggiore per avere una minore resistenza elettrica. È stato quindi condotto uno studio e la successiva sperimentazione su una struttura alternativa, composta da un multilayer trasparente e conduttivo in AZO/Ag/AZO che potenzialmente può offrire una bassa resistenza dovuta al "canale" in argento ed una proprietà antiriflettente con spessori contenuti di AZO. La messa a punto della struttura ottimale per il dispositivo ad eterogiunzione da realizzare è stata articolata in varie fasi:

- determinazione della legge di dispersione (n , k) e resistività dell'AZO cresciuto per RF-sputtering;
- progettazione della struttura AZO/Ag/AZO con simulatore ottico;
- realizzazione della struttura con interlayer di argento cresciuto per evaporazione e-gun;
- caratterizzazioni ottiche ed elettriche del multistrato cresciuto su wafer in c-Si.

La determinazione della legge di dispersione è stata ottenuta da misure spettrofotometriche di riflettanza (R) e trasmittanza (T) per vari campioni di AZO a film sottile cresciuti su vetro (Corning 7059, 10 x 10 cm²), tramite deposizione per RF-sputtering. Le costanti ottiche (n , k) sono state stimate mediante software dedicato con metodo di inversione e sono mostrate in Figura 153.

La trasmittanza e la riflettanza di uno strato di AZO di 80 nm, pesate con lo spettro solare nell'intervallo di interesse 300-1200 nm, risultano $T_s = 82,2\%$ e $R_s = 15,8\%$ e quindi l'assorbanza è $A_s = 2\%$, il che evidenzia una buona trasparenza del materiale. La resistività (ρ), valutata a partire da misure elettriche a 4 punte, è risultata $\rho = 1,9 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}$ e rappresenta un valore tipico del materiale. Una volta nota la legge di dispersione del materiale si è proceduto alla deposizione di AZO su wafer di c-Si, sia per valutarne le condizioni di crescita a parità di processo di sputtering sia per ottenere una verifica indiretta della stima di (n, k) ottenuti con metodo di inversione.

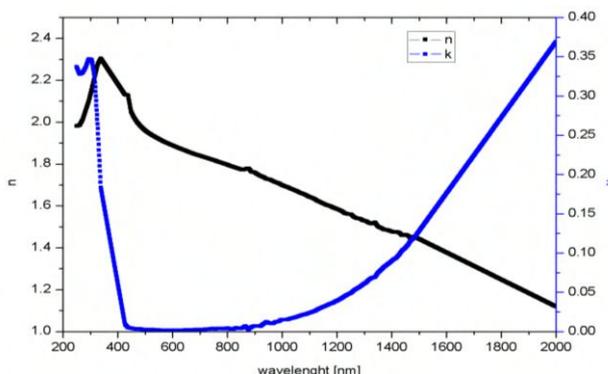


Figura 153. Costanti ottiche (n, k) stimate per l’AZO con il metodo di inversione

Le misure di riflettanza fatte su vari campioni sono in ottimo accordo con simulazioni ottenute mediante software di progettazione ottica XOP. La misura di spessore con profilometro è stata effettuata su più punti della superficie del layer di AZO, sia su c-Si che su vetro per poterne valutare l’uniformità di spessore vista la criticità di tale parametro nella risposta spettrale di una struttura multistrato. E’ risultata una buona uniformità pari al $\pm 3\%$ su di un area di $5 \times 5 \text{ cm}^2$, cioè sufficiente per contenere il dispositivo finale.

La progettazione ottica del multistrato AZO/Ag/AZO con software XOP si è basata sulla legge di dispersione ottenuta per l’AZO, mentre per l’argento non è stato possibile valutarne le caratteristiche ottiche per problemi legati a spessori troppo piccoli ($< 10 \text{ nm}$) e si sono quindi utilizzati dati di libreria (Ag bulk): ci si aspetta dunque una qualche discrepanza tra le proprietà ottiche di bulk dell’argento da quelle a film sottile. A valle di uno studio intensivo di R e T di multistrati su vetro, ottenuti al variare degli spessori dei singoli strati, si è individuato un intervallo ottimale di spessori per lo strato di Ag (7- 9 nm) e per AZO (50-100 nm). Sono state quindi realizzate varie strutture ed in Tabella 36 sono riassunte le caratteristiche optoelettroniche dei multistrati più significativi. Le indicazioni fornite dalla sperimentazione su substrati in vetro sono servite per la successiva sperimentazione su c-Si, utilizzando wafer desossidati in HF con e senza aggiunta di un layer in n-SiO_x (emitter della cella), al fine di testare il multistrato in condizioni operative. La Tabella 37 riassume le caratteristiche optoelettroniche misurate sui multistrati cresciuti su c-Si. Il profilo di riflettanza risulta, ovviamente, diverso rispetto al caso in cui il multistrato sia depositato su vetro, visti i differenti contrasti di indice di rifrazione all’interfaccia vetro/AZO e cSi/AZO, mentre dalle misure effettuate si riscontra che il sottile strato di n-SiO_x non altera in modo significativo il profilo di riflettanza. In Figura 154 è mostrato il confronto tra le riflettanze di 2 multistrati depositati su c-Si e della superficie nuda del wafer. Da tale figura è possibile evidenziare la proprietà antiriflettente dei multistrati, e la migliore performance pertinente alla configurazione asimmetrica AZO(100nm)/Ag(8nm)/AZO(50nm). Tale multistrato appare quindi essere il miglior candidato per essere utilizzato come struttura frontale della cella ad eterogiunzione.

Tabella 36. Resistenza sheet, resistività, trasmittanza e riflettanza pesate su spettro solare (range 300-1200nm) misurate su strutture a multistrato depositate su vetro

Vetro/AZO/Ag/AZO Spessore (nm)	Resistenza Sheet (Ω/sq)	Resistività ($\Omega \text{ cm}$)	Trasmittanza (%)	Riflettanza (%)
50/7/50	18	$1.9 \cdot 10^{-4}$	65.4	8.6
50/8/50	10	$1.07 \cdot 10^{-4}$	67.82	9.8
50/9/50	12	$1.3 \cdot 10^{-4}$	65.6	9.85
100/8/50	12.5	$2 \cdot 10^{-4}$	64.9	10.9

Tabella 37. Resistenza sheet, resistività, trasmittanza e riflettanza pesate su spettro solare (range 300-1200nm) misurate su strutture a multistrato depositate su c-Si

c-Si/AZO/Ag/AZO spessore (nm)	Resistenza Sheet (Ω/sq)	Resistività ($\Omega \text{ cm}$)	Riflettanza (%)
50/7/50	15	$2.5 \cdot 10^{-4}$	15
50/9/50	10.4	$1.1 \cdot 10^{-4}$	10.4
100/8/50	15.5	$2.5 \cdot 10^{-4}$	9.8

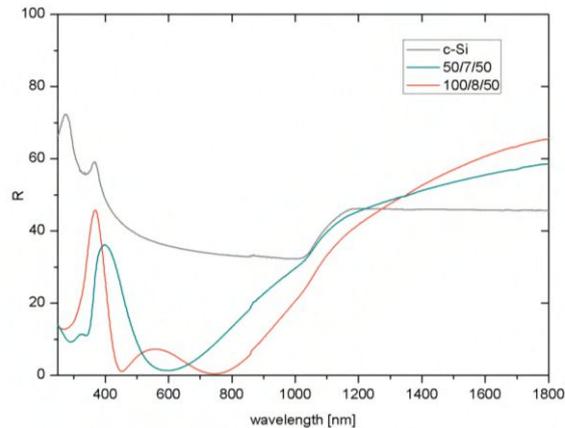


Figura 154. Riflettanza misurata su due diverse strutture a multistrato depositate su c-Si. Per confronto nella figura è riportata anche la riflettanza del semplice wafer di c-Si

3. La griglia di raccolta frontale ed il contatto con il TCO

Per migliorare il Fill Factor della cella è necessario aggiungere al TCO una griglia metallica realizzata mediante serigrafia in modo da garantire un'efficace raccolta laterale su grandi superfici. Nella tecnologia ad eterogiunzione le temperature convenzionali di firing per serigrafia (800°C) sono nocive al dispositivo, per questo la serigrafia su queste celle deve essere eseguita a bassa temperatura (< 200°C). La bontà del contatto ohmico, la conducibilità del metallo (tipicamente Ag) e l'aspetto della griglia dipendono dal processo di stampa e dalle paste utilizzate, basate su medium organici e polimerici, i quali consentono una sinterizzazione anche a bassa temperatura, soddisfacendo i requisiti di resistività del metallo dopo la sinterizzazione, resistività specifica di contatto ed adesione su TCO. Il telaio ed i parametri di stampa vanno scelti ed ottimizzati in funzione della pasta da utilizzare per poter ottenere dei finger di altezza superiore ai 10-15 µm. Il processo termico può essere effettuato in un forno a nastro con elementi riscaldanti a raggi infrarossi (*dryer*) in presenza di un flusso di aria, che contenendo ossigeno può facilitare il burning della resina polimerica. Tuttavia l'ossigeno è un componente dei TCO e ne influenza la trasparenza e la conducibilità. Di conseguenza l'impiego nel *dryer* di un flusso di azoto potrebbe essere vantaggioso per non alterare le proprietà del TCO. Inoltre è da valutare l'impiego di un primo processo termico (*pre-dry* a 80 °C per 5 min) per ottenere un conduttore più compatto e quindi meno resistivo. Negli esperimenti condotti sono state investigate diverse paste per celle solari ad eterogiunzione, tra cui la Solamet PV412 della Dupont, ed una pasta sperimentale proposta dalla Chimet (AG 200 EI). Sono stati condotti dei test volti a determinare i migliori risultati in termini di stampa serigrafica e la variabilità nelle condizioni di curing (temperatura, atmosfera gassosa) sulle caratteristiche finali dei finger, quali conducibilità e resistenza di contatto su TCO. Le paste considerate sono state stampate su vetrini ricoperti da ITO di resistenza di sheet 40-50 Ω/sq. Al fine di poter misurare la resistività specifica di contatto (ρ_{cont}) espressa in $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ mediante *Transfer Length Method* (TLM), sono stati stampati dei pattern consistenti in linee disposte a spaziatura variabile. I parametri di stampa sono stati ottimizzati per le due paste. Sono stati realizzati diversi campioni per ogni pasta che sono stati trattati secondo una matrice con le seguenti variabili: temperatura di curing 150 o 200°C per 1 min; flusso di aria o azoto, applicazione o meno del *pre-dry*. Tutti i campioni sono stati caratterizzati mediante misure di: i) resistività specifica di contatto mediante TLM; ii) resistenza di linea su finger da 0,5x8 mm²; iii) profilo del finger (valutazione del rapporto di aspetto); iv) conducibilità della pasta. I parametri di stampa ottimizzati hanno consentito dei finger di altezza massima tra i 15 ed i 25 µm. La pasta Chimet Ag 200 Ei, più plastica, ha seguito più fedelmente il disegno riportato sullo schermo, con finger generalmente più stretti rispetto alla PV412, ma con una superficie crestata. La pasta Dupont invece tendeva a rimanere liquida più a lungo, quindi a sviluppare in altezza, debordando lievemente a lato e producendo delle linee più larghe e finger a sezione triangolare. Nello specifico, la media di tutte le misure effettuate si può così riassumere:

- PV412 - larghezza: 520 µm; altezza: 19,4 µm;
- Ag 200 EI - larghezza: 460 µm; altezza: 15,9 µm.

Per la valutazione della resistività dell'argento, è stata eseguita una misura della resistenza dei singoli finger e della sezione dei conduttori calcolando la resistività del bulk dei conduttori (ρ_{Ag}) espressa in $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$. Il trattamento di *pre-dry* è efficace nel ridurre la resistività di Ag solo per la pasta Chimet e per curing a 150 °C, mentre influenza la PV412 nella resistività specifica di contatto. Si è notato un netto miglioramento della ρ_{cont} e della conducibilità per la DuPont alla temperatura di curing di 200 °C, quando si utilizza azoto invece che aria. La resistività minore è registrata dalla 200EI (46 µΩ·cm), di poco inferiore a quella della PV412 (circa 60 µΩ·cm). Tuttavia la sua ρ_{cont} è decisamente superiore, quindi la pasta Dupont è da preferirsi. Per l'ITO è stato evidenziato un incremento da

47 a 55 Ω/sq dopo curing a 200° C indipendentemente dal tipo di gas utilizzato. Dal punto di vista ottico non ci sono state variazioni.

Alla luce di queste considerazioni si sono definite le condizioni di stampa ed utilizzo della pasta DuPont PV412 per la serigrafia di contatti metallici su ITO per le celle ad eterogiunzione: stampa con Forza=3 kg, velocità =150 mm/s, Snap-Off= 0,3 mm; curing a temperatura 200 °C, atmosfera di azoto, tempo di curing 18 min, senza pre-dry. La serigrafia a bassa temperatura così ottimizzata è stata impiegata anche per la metallizzazione di celle solari con emitter di n-SiO_x e TCO frontale costituito da un *tri-layer* di ZnO/Ag/ZnO.

4. Il riflettore posteriore

L'attività di ricerca sul riflettore posteriore della cella fotovoltaica, atto a confinare la radiazione infrarossa scarsamente assorbita dal silicio cristallino, è stata focalizzata sull'ottimizzazione di una struttura multilayer in configurazione Bragg ottenuta alternando strati di materiali ad alto (n_H) e basso (n_L) indice di rifrazione (a-Si:H/SiN_x) cresciuti con tecnologia PECVD convenzionale. Una prima fase è consistita nella messa a punto del processo di deposizione su vetro dei due materiali, mediante il sistema Plasmalab800 (Oxford Inst.), in modo da ottenerne le leggi di dispersione da misure di riflettanza e trasmittanza. L'obiettivo principale è stato quello di migliorare il rapporto n_H/n_L , cercando soprattutto di diminuire l'indice di rifrazione del nitruro: ad un rapporto maggiore corrisponde una maggiore riflettanza a parità di coppie di strati. Il primo strato depositato su c-Si per il riflettore Bragg è in a-Si:H e, poiché esso deve svolgere anche una funzione passivante sul wafer, durante la fase di messa a punto del processo di deposizione sono state operate misure di lifetime dei portatori. La messa a punto del processo di deposizione per PECVD consiste nell'ottimizzare le proprietà dei materiali, variando i parametri di deposizione (temperatura, flussi di gas, pressione di processo, potenza del segnale RF). Per il processo di deposizione di SiN_x è stato utilizzato silano (SiH₄) in forte diluizione di azoto (N₂), variandone il rapporto e tenendo costante il flusso totale a 1250 sccm. Dalla legge di dispersione ricavata da R e T per campioni depositati su vetro con flusso di silano pari a 18 sccm ed a diverse temperature, pressioni e potenza RF, si è scelto di fissare T = 150 °C, p = 750 mtorr e P = 100 W per i quali si ottiene un minimo dell'indice di rifrazione alla lunghezza d'onda di interesse $\lambda = 950$ nm. Diluendo ulteriormente il silano fino a 3 sccm (su 1250 sccm totali) si è ottenuto un materiale altamente trasparente con $n(950 \text{ nm}) = 1,67$, ma con tasso di crescita minore (da 5,5 a 1,7 Å/s).

Il processo di deposizione del silicio amorfo su vetro è stato ottimizzato a 150 °C in modo da non variare la temperatura di processo durante la realizzazione di un multistrato. E' stato utilizzato un flusso di silano puro, con potenza massima di 50 W oltre la quale si ha formazione di polveri all'interno della camera di reazione. Il processo è stato messo a punto con flusso di SiH₄ di 40 sccm, p = 300 mtorr e P = 40 W con un tasso di crescita risultante di circa 2,3 Å/s. Dalla legge di dispersione, ottenuta da misure ellissometriche, si ricava $n = 3,5$ a 950 nm. La funzione del layer in a-Si:H depositato su c-Si come passivante superficiale è stata testata da misure di lifetime dei portatori con metodo QSSPC ((Quasi Steady State Photo Conductance), con 30 nm di materiale depositato su entrambe le superfici del wafer. Per wafer p-type di alta qualità (FZ, <100>, 250 μm , 2 Ωcm) si è registrato un ragionevole valore di 113 μs a valle di un trattamento di annealing di 10 minuti a T = 200 °C.

Le leggi di dispersione del silicio amorfo e del nitruro hanno permesso la progettazione e realizzazione di riflettori di tipo Bragg, i cui layer hanno spessore ottico di $\frac{1}{4}$ di lunghezza d'onda di Bragg (λ_B) la quale individua il centro banda del profilo di riflettanza. La messa a punto della struttura è stata ottenuta variando la lunghezza d'onda di Bragg $\lambda_B = 900, 950$ e 1000 nm ed il numero di coppie $N = 1, 2, 4$. E' importante sottolineare che il multistrato serve a riflettere la radiazione all'interno del wafer di c-Si all'interfaccia tra multistrato e silicio, mentre le misure di riflettanza con spettrofotometro sono solo possibili "dall'esterno", incidendo cioè sul riflettore dall'aria, e quindi il corretto funzionamento del Bragg è da valutarsi solo da misure sul dispositivo fotovoltaico finale. La simulazione della riflettanza interna, ovvero all'interfaccia c-Si/Bragg nella struttura c-Si/Bragg/Alluminio/aria, è stata svolta facendo variare i parametri λ_B e N. In Figura 155 è riportato ad esempio l'andamento della riflettanza simulata al variare di N con λ_B fissato a 950 nm e per confronto anche la riflettanza con il solo layer passivante in a-Si, da dove si evince che è possibile ottenere un adatto profilo di riflettanza già con 2 coppie, mentre con 4 coppie si ha una riflettanza > 95% nell'intervallo 800-1250 nm. Sono quindi stati realizzati alcuni riflettori, fissando λ_B a 950 nm e variando il numero di coppie.

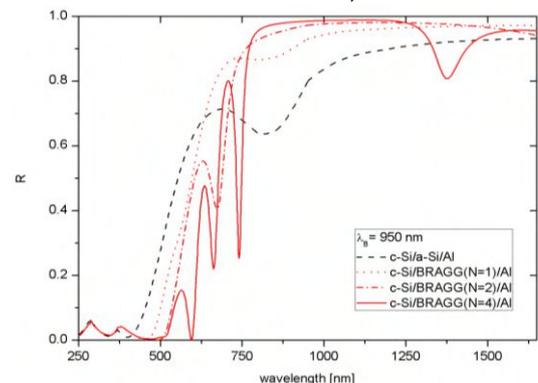


Figura 155. Simulazione di riflettanza interna per $\lambda_B = 950$ al variare di N

In Figura 156 è mostrata la riflettanza “esterna” misurata per un numero di coppie pari a 4. Tale dato mostra un ragionevole accordo tra la misura e la simulazione elaborata su questa struttura. La leggera discrepanza osservata per lunghezze d’onda > 1000 nm è imputabile ai limiti del software di simulazione ottica utilizzato.

5. La testurizzazione del silicio cristallino

Il processo di testurizzazione è necessario sia per ridurre le perdite per riflessione della componente diretta della radiazione solare incidente sulla cella solare sia per aumentare lo scattering della luce nel dispositivo. In tal modo si ottiene anche un confinamento ottico dei fotoni nel cristallo che determina un efficace assorbimento della radiazione soprattutto nel caso in cui siano utilizzati wafer sottili. Nel caso del c-Si la testurizzazione consiste nella formazione di microstrutture sulla superficie mediante un etching anisotropo, eseguito generalmente a caldo con soluzioni acquose alcaline, con il quale viene attaccato in modo preferenziale il piano del silicio <100>, portando alla formazione di piramidi a base quadrata, disposte in modo più o meno casuale. Tuttavia una morfologia non adeguata della superficie del wafer può generare effetti indesiderati di micro-shunt sul dispositivo. Al fine di ridurre tali effetti, studi recenti mostrano che un etching isotropo acido può essere aggiunto al processo di testurizzazione, come post-trattamento, per smussare la parte superiore delle piramidi (*smoothing*). Nella presente attività di ricerca wafer di c-Si (p-doped CZ, orientazione <100>, resistività 0,7-1,3 Ωcm) sono stati sottoposti a trattamenti di testurizzazione e successivo smoothing e caratterizzati otticamente mediante spettrofotometro UV-Vis-NIR e morfologicamente con microscopio elettronico a scansione. La testurizzazione è stata eseguita utilizzando una miscela ternaria di idrossido di potassio, alcol isopropilico ed acqua, a caldo. I campioni testurizzati sono stati sottoposti ad un processo di smoothing in HF/HNO₃ a temperatura ambiente. Entrambi i processi sono influenzati dalla concentrazione relativa dei reagenti, dalla temperatura e dal tempo di attacco. La durata del processo di testurizzazione è stata variata da 10 a 40 min, ottenendo delle piramidi di altezza crescente da circa 1 μm a 10-12 μm. I valori di riflettanza per i campioni testurizzati risultano decisamente inferiori rispetto a quelli del wafer originale per lunghezze d’onda fino a 1000 nm (Figura 157).

6. Difetti di interfaccia a-Si:H/c-Si

Un elemento fortemente critico ai fini dell’ottimizzazione del dispositivo è costituito dai difetti di interfaccia principalmente dovuti alla presenza di legami di silicio non saturi sulla superficie di un cristallo. Questi legami insaturi (dangling bonds) introducono dei livelli energetici indesiderati all’interno della gap proibita del semiconduttore e contribuiscono alla ricombinazione dei portatori generati o in transito per quella posizione spaziale. A questa indesiderata distribuzione di difetti va ad aggiungersi tutto ciò che involontariamente si appoggia sulla superficie del cristallo, ovvero polveri e residui di lavorazione, che contribuiscono ulteriormente alla formazione di difetti. Un modo efficace per passivare la gran parte di questi difetti è stato messo a punto nel corso di numerosi studi riportati in letteratura e si basa su una deposizione di un film di a-Si:H sulla superficie del c-Si. Sebbene anche il materiale a-Si:H sia molto difettato al suo interno, la presenza di un’elevata concentrazione di atomi di idrogeno tende a passivare, ovvero rendere quanto più possibile inefficaci, i suddetti dangling bonds in termini di ricombinazione di portatori fotogenerati. Il vantaggio dell’utilizzo del a-Si:H nel ruolo di passivante della superficie del silicio risiede nella bassa temperatura di deposizione (<200 °C). Questa caratteristica ben si connette con la necessità di evitare processi ad alta temperatura sul silicio cristallino nel caso esso sia molto sottile (<100 μm di spessore) per evitare problemi di stress meccanico. Quindi tutti i processi di ossidazione termica a temperatura elevata (>1000°C) che tipicamente vengono utilizzati per passivare la superficie del silicio, nonostante la loro efficacia, sono oggi di scarso interesse, in quanto la specifica di spessore di silicio sottile è ormai stringente per ridurre i costi delle celle solari a base di silicio. Per evidenziare e quantificare l’effetto della densità di difetti di interfaccia, sono state effettuate delle simulazioni della struttura di cella al variare della densità complessiva di difetti di interfaccia D_{it} . In Figura 158a sono riportate le simulazioni delle caratteristiche tensione-corrente in AM1.5G della cella solare in funzione della densità di difetti superficiali D_{it} in un intervallo da 10^{11} a 10^{13} cm⁻². Dalle

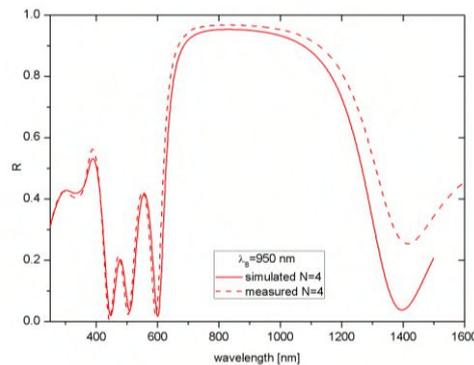


Figura 156. Riflettanza “esterna” misurata e simulata con N = 4 e $\lambda_B = 950$

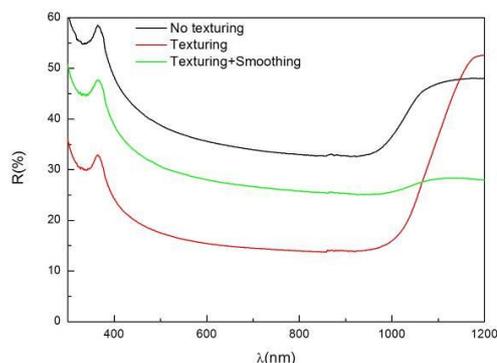


Figura 157. Spettro di riflettanza di c-Si prima e dopo il processo di smoothing

caratteristiche è evidente che l'aumento di D_{it} tende a ridurre l'efficienza della cella solare. Sebbene sarebbe auspicabile ridurre la D_{it} anche al di sotto di 10^{11} cm^{-2} , questo non è praticamente possibile con costi bassi ed un valore di 10^{11} cm^{-2} rappresenta comunque un buon compromesso fra i desideri e la pratica industriale. Per avere un ulteriore dettaglio del fenomeno, sono riportati in Figura 158b i parametri fotovoltaici FF e V_{oc} ottenuti dalla simulazione al variare della D_{it} . Dal punto di vista sperimentale sono state effettuate diverse prove per ottenere un livello di passivazione superficiale del wafer di silicio compatibile con la specifica di $D_{it} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Si è notato che depositare direttamente lo strato di SiO_x su silicio non produceva risultati apprezzabili in termini di lifetime dei portatori fotogenerati nel wafer di silicio. Misure di Quasi Steady State Photo-Conductance Decay (QSSPCD) relative alla struttura simmetrica $\text{SiO}_x/\text{c-Si}/\text{SiO}_x$ da cui si desume il tempo di vita (*lifetime*) efficace del bulk di silicio, hanno dato valori di poche decine di μs , corrispondenti ad una D_{it} prossima a 10^{13} cm^{-2} , su wafer aventi dato di targa di 500 μs . Viceversa la passivazione della superficie di silicio mediante deposizione di film di a-Si:H ha consentito di raggiungere livelli di lifetime prossimi al bulk di c-Si.

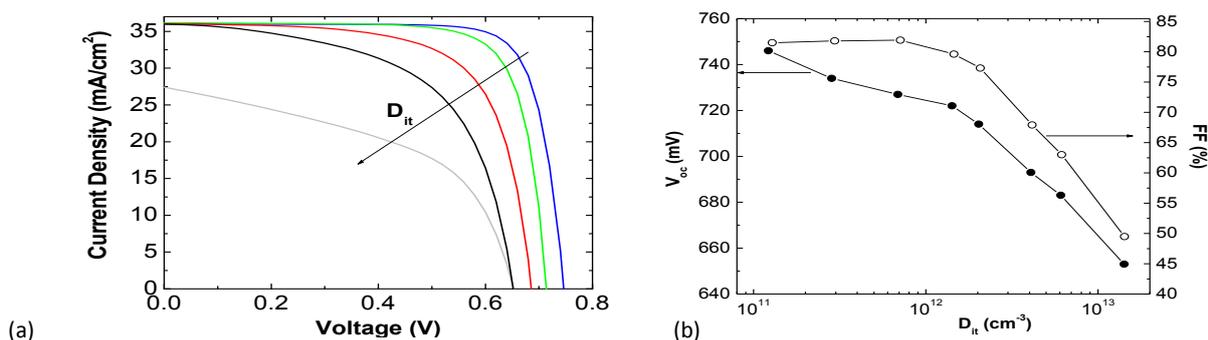


Figura 158. Simulazioni di caratteristiche I-V in AM1.5G (a) e parametri fotovoltaici desunti da tale simulazione (b) al variare della D_{it} della cella solare ad eterogiunzione

7. Emitter n-SiOx

E' stato sviluppato un emitter innovativo a base di ossido di silicio (n-SiO_x) per celle ad eterogiunzione, utilizzando le competenze acquisite su tale tipo di materiale nell'ambito degli studi sulle celle tandem micromorfe. Anche in questo caso la tunabilità delle proprietà optoelettroniche del materiale possono costituire un vantaggio nell'applicazione al dispositivo. Il materiale è stato caratterizzato ed ottimizzato per ottenere una inferiore energia di attivazione del drogante (E_{att}) ed una mobilità maggiore di quanto sarebbe ottenibile con un tipico emitter basato su a-Si:H. Le caratteristiche di questo materiale, nel corso delle analisi, si sono rivelate sempre migliori rispetto al n-a-Si:H. Ad esempio il valore E_{att} si mantiene sempre basso anche per spessori di film molto sottili. Questa proprietà rappresenta un vantaggio consistente rispetto al caso del a-Si:H che invece soffre di un aumento consistente di E_{att} nel caso di film dello spessore di 10 nm come riportato in letteratura. In Figura 159 sono riportate le E_{att} e le conducibilità del film di n-SiO_x depositato a differenti temperature e pressioni di lavoro in funzione dello spessore del film stesso.

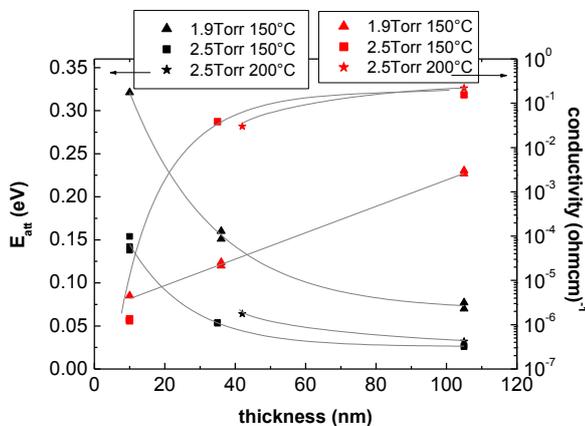


Figura 159. E_{att} e conducibilità di film di SiO_x drogato n a differenti spessori al variare di temperatura e pressione di lavoro

Sono state anche misurate le mobilità degli elettroni per tre tipi di film di SiO_x ed in particolare si è riscontrato un valore di $1,7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ per i film depositati a 1,9 torr e $150 \text{ }^\circ\text{C}$, $2,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ per i film depositati a 2,5 torr e $150 \text{ }^\circ\text{C}$ e $3,4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ per i film depositati a 2,5 torr e $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Dalle analisi eseguite, è stato deciso di utilizzare strati di SiO_x depositati alla pressione di 2,5 torr e alla temperatura di $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Sono state realizzate celle a eterogiunzione in cui è stato variato lo spessore dell'emitter in SiO_x . La Figura 160 mostra la risposta quantica interna misurata sui vari dispositivi. Per confronto nella stessa figura è riportata la risposta quantica interna di un'analogica cella ad eterogiunzione con uno spessore di 10 nm di n-a-Si:H. E' evidente che a parità di spessore dello strato di emitter l'efficienza quantica della cella con SiO_x si mantiene costantemente superiore a quella con emitter di tipo n-a-Si:H nella regione blu dello spettro solare grazie alla maggiore trasparenza del SiO_x .

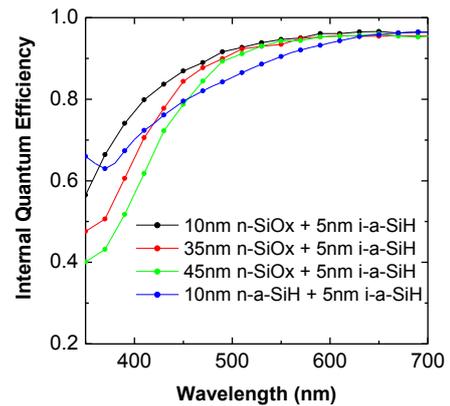


Figura 160. Efficienza quantica interna di celle a spessore di emitter differenti di SiO_x e confronto con cella ad emitter di tipo n-a-Si:H

Nelle sezioni precedenti sono stati discussi tutti gli step di processo che determinano nel loro insieme le prestazioni del dispositivo a eterogiunzione. E' possibile mostrare come, simulando una cella ad eterogiunzione con tutte le migliorie di processo finora prese in considerazione, sia possibile ottenere un'alta efficienza di conversione fotovoltaica. In Figura 161 è riportata la caratteristica corrente-tensione in AM1.5G della cella simulata introducendo i dati e le proprietà elettriche ed ottiche determinate sui singoli materiali finora analizzati. In particolare sono state introdotte nella simulazione le riflettanze sperimentali misurate sulla struttura AZO/n SiO_x /a-Si:H/c-Si/Bragg/Al ed i seguenti valori caratteristici dei singoli materiali desunti dalle ottimizzazioni riportate in precedenza:

$E_{\text{att SiO}_x} = 0.12 \text{ eV}$
 Mobilità $\text{SiO}_x = 2.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 Conducibilità $\text{SiO}_x = 0.05 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
 $E_{\text{gap SiO}_x} = 2.1 \text{ eV}$
 Spessore $\text{SiO}_x = 10 \text{ nm}$
 Mobilità a-Si:H = $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 Spessore a-Si:H = 5 nm
 $E_{\text{gap a-Si:H}} = 1.72 \text{ eV}$
 $D_{\text{it}} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
 $\chi_{\text{SiO}_x} = \chi_{\text{a-Si:H}} = 3.9 \text{ eV}$
 $\Phi_{\text{TCO}} = 4.2 \text{ eV}$
 $R_{\text{sheet TCO}} = 15.7 \Omega/\text{sq}$
 Resistività p-c-Si = $1 \Omega \text{ cm}$
 Spessore p-c-Si = $100 \mu\text{m}$
 Riflettanza interna = 97%
 Riflettanza esterna = 6%
 Resistenza serie TCO = $0.06 \Omega \text{ cm}^2$
 $\rho_{\text{c Ag}} = 0.32 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$

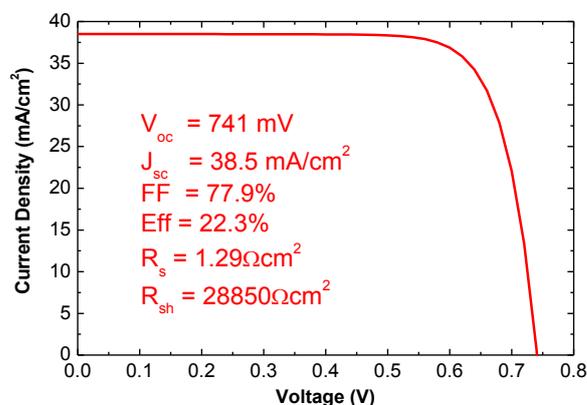


Figura 161. Caratteristica corrente-tensione in AM1.5G della cella ad eterogiunzione simulata in base ai parametri sperimentali desunti dalle ottimizzazioni

La simulazione riportata è sicuramente utile a delineare le prospettive che questo tipo di struttura apre verso il raggiungimento di efficienze di conversione fotovoltaica ben superiori ai valori delle attuali celle commercializzate e realizzate a partire da substrati di silicio drogato di tipo p.

In conclusione si può ragionevolmente affermare che, sebbene dal punto di vista sperimentale le celle ad eterogiunzione finora realizzate non abbiano superato una efficienza del 16% (deliverable previsto per questa linea di attività), sono stati individuati i punti critici e sono stati ottimizzati sia i materiali che i processi per la realizzazione delle varie interfacce. Si ritiene quindi di poter ampiamente ottenere i risultati previsti in termini di efficienza di dispositivo nei prossimi mesi.

d. Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Lo studio del $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) come materiale innovativo per la realizzazione di celle fotovoltaiche a film sottile è un argomento che sta raccogliendo un interesse sempre maggiore. Oltre alla possibilità di sviluppare celle a film sottile con prestazioni analoghe a quelle del CIGS (efficienza > 20%), ma senza utilizzare elementi rari, un fattore

che contribuisce ad attirare l'attenzione sul CZTS è la possibilità di realizzare celle *tandem* che possano superare il limite termodinamico del 30% imposto ai dispositivi basati su una singola giunzione. Per esempio l'efficienza limite imposta dalla termodinamica ad una cella tandem CZTS/c-Si è del 42,5%.

Questa possibilità, contemplata in questo progetto fin dal suo inizio, è ormai perseguita con decisione da svariati gruppi nel mondo. In Europa, per esempio, l'IMEC, insieme al suo laboratorio associato IMOMEC e a Solliance (un consorzio Europeo di R&D dedicato al thin-film PV che comprende anche l'Helmholtz Zentrum di Berlino), sta lavorando attivamente dal 2011 allo sviluppo del CZTS ($E_g=1,5$ eV) e del CZTSe ($E_g=1$ eV) per la fabbricazione di celle tandem a film sottile di alta efficienza. Al momento sono stati ottenuti buoni risultati soprattutto sul CZTSe ($Cu_2ZnSnSe_4$) con il quale è stata realizzata una cella con il 9,7% di efficienza.

Un approccio molto simile a quello che si è scelto di seguire nell'ambito di questo progetto è utilizzato invece dall'Australian Research Council (ARC) Photovoltaics Centre of Excellence. Oltre ad ottimizzare le celle singole in CZTS, l'obiettivo del gruppo australiano è lo sviluppo delle tecniche di crescita epitassiale del CZTS su silicio per costruire delle celle tandem CZTS/c-Si. Questo progetto è in corso e alla fine del 2012 ha ricevuto dal Governo Federale un finanziamento di 6,7 M\$ attraverso l'USASEC Open Funding Round. L'ARC porta avanti le attività insieme a Suntech R&D Australia e agli Istituti americani National Renewable Energy Agency (NREL) e Colorado School of Mines. Non si può infine dimenticare l'accordo tra IBM e Solar Frontier (il maggiore produttore mondiale di moduli in CIGS), firmato il 19 ottobre 2010 per lo sviluppo delle celle in CZTS. Queste due industrie detengono entrambi i record di efficienza sul CZTS e sul CZTSe, ma i termini e le finalità del loro accordo non sono noti.

L'obiettivo principale della ricerca per l'annualità corrente è stato la realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) con efficienza superiore al 5%. Nella scorsa annualità era stato messo a punto un processo per la realizzazione di celle fotovoltaiche, in cui il materiale attivo, il CZTS, era realizzato depositando per evaporazione e-beam i precursori *stacked*, composti da un multilayer di ZnS, Sn e Cu, che venivano sottoposti successivamente ad un annealing in presenza di zolfo. Con questo processo era stata ottenuta un'efficienza del 2,5%, ma erano stati evidenziati problemi di riproducibilità, di segregazione dei solfuri binari (ZnS , SnS_x , Cu_xS) e di disomogeneità composizionale del materiale lungo lo spessore del film.

A valle di un'analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si era perciò deciso di sviluppare un nuovo processo in cui i tre solfuri metallici (per esempio ZnS, CuS e SnS) venissero depositati contemporaneamente, in modo che i metalli nei precursori fossero distribuiti fin dall'inizio in maniera uniforme e già sostanzialmente solforizzati. Alla fine della scorsa annualità era, quindi, stato effettuato un up-grade del sistema di sputtering confocale per passare al co-sputtering da solfuri.

L'attività svolta nella corrente annualità ha, quindi, avuto lo scopo di mettere a punto il processo di crescita del CZTS per co-sputtering, effettuando un confronto critico con la tecnica precedentemente utilizzata. A seguito dell'installazione di un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti (Mo, ZnO) avvenuta a novembre 2012, è stata necessaria una nuova ottimizzazione dei relativi processi di crescita che ha determinato un miglioramento delle caratteristiche di questi materiali. E', inoltre, proseguita l'attività dell'Università di Trento sulla deposizione del CZTS da precursori da fase liquida.

Il lavoro svolto sui materiali costituenti il dispositivo ha dato risultati molto soddisfacenti, consentendo di ottenere un'efficienza massima sul dispositivo del 5,6%. La velocità con cui progredisce l'efficienza dei dispositivi sviluppati in ENEA autorizza di essere ottimisti sulla possibilità di agganciare in tempi brevi i gruppi leader del settore.

L'attività di ricerca è stata svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento e con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Sapienza".

A parte l'attività sulla deposizione da fase liquida che è stata condotta autonomamente dal DICAM, la collaborazione con le università è stata così stretta da rendere impraticabile una descrizione separata dei diversi contributi. Si può attribuire all'Università di Trento il grosso delle attività di caratterizzazione strutturale tramite XRD di tutti i materiali utilizzati, mentre al Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Sapienza" è stata svolta gran parte della caratterizzazione ottica (spettrofotometria, luminescenza e Raman) dei materiali. Anche le misure di composizione sono state effettuate nelle due Università (EDX e XRF a Trento ed EDX alla Sapienza).

Prima di entrare nel dettaglio delle attività tecniche si vuol dare menzione delle due importanti implementazioni in termini strumentali rese possibili nell'ambito del progetto, a cui si è già fatto riferimento. La prima è stata l'upgrade del sistema di co-sputtering, consistente nell'installazione di due nuovi generatori e di un nuovo software di controllo. Il sistema è equipaggiato con tre catodi magnetron da 4 pollici su cui sono stati installati target di CuS, SnS e ZnS. Il secondo sputtering, entrato in funzione a fine 2012, è un sistema in linea capace di depositare film con buona omogeneità su substrati fino a 15×15 cm². Attualmente ha tre catodi: uno, con alimentazione in RF, è utilizzato per la deposizione dello ZnO intrinseco, mentre gli altri due, con alimentazione in DC, sono usati per la deposizione di ZnO:Al e Mo. In Figura 162 sono riportate le immagini dei due sistemi di

sputtering utilizzati. Per rendere ancora più flessibile e produttivo il sistema è stata avviata l'acquisizione di un quarto catodo da utilizzare per la deposizione di ITO o di un metallo e di una camera di load-lock.

Di seguito si dà una descrizione sintetica delle attività svolte, rimandando per approfondimenti ai rapporti RdS/2013/010 e 011.

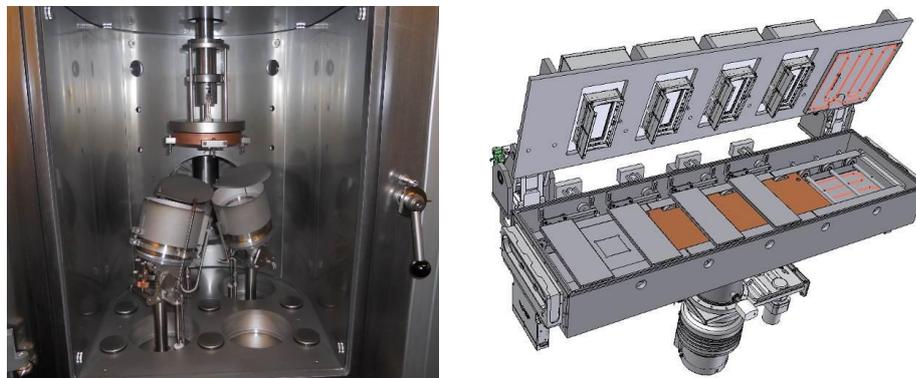


Figura 162. Impianti per il co-sputtering di solfuri binari (configurazione confocale, a sinistra) e per lo sputtering in linea di Mo, ZnO e ZnO:Al (configurazione planare, a destra)

d.1 Crescita del CZTS da precursori depositati per evaporazione e-beam

Nel corso di questa annualità sono stati portati a termine alcuni studi (in parte avviati nella precedente annualità) sulle proprietà dei film sottili di CZTS cresciuti a partire da precursori a base di rame, stagno e solfuro di zinco, depositati per evaporazione *e-beam*. In particolare è stato completato lo studio sulle proprietà ottiche del materiale e sull'influenza delle diverse stechiometrie sul coefficiente di assorbimento. E' stato studiato come la composizione chimica del materiale influenza le proprietà microstrutturali dei film, affiancando alla caratterizzazione XRD effettuata in laboratorio con sorgenti convenzionali, quella con la radiazione di sincrotrone.

Parallelamente allo studio delle proprietà fisiche di base dei film di CZTS, le attività sono state rivolte all'ottimizzazione del materiale come strato assorbitore nei dispositivi fotovoltaici. A tal fine sono state effettuate diverse prove per ottimizzare sia il processo di solforizzazione che la stechiometria e la struttura dei precursori di partenza. Questo lavoro ha portato a un primo miglioramento dei dispositivi finali rispetto a quelli ottenuti nella scorsa annualità con lo stesso processo di crescita, passando da un'efficienza fotovoltaica del 2,45% a un massimo del 3,2%.

Effetti della stechiometria sulle proprietà ottiche e microstrutturali

Proseguendo il lavoro iniziato lo scorso anno, si è studiata la correlazione tra le caratteristiche dello spettro di assorbimento del CZTS e la sua stechiometria. Il coefficiente di assorbimento è stato misurato sia attraverso normali misure spettrofotometriche, sia utilizzando la Photothermal Deflection Spectroscopy (PDS). Gli esperimenti sono stati effettuati su parecchi campioni di CZTS con stechiometrie e valori della gap molto diversi tra loro.

Il lavoro svolto ha confermato, su una base sperimentale più ampia, che i film di CZTS possono assumere sostanzialmente due valori della gap: circa 1,48 eV in quelli con un basso contenuto di stagno e circa 1,61 eV in quelli con un contenuto sopra una certa soglia. La disponibilità di un maggior numero di misure di PDS, ha permesso uno studio più accurato dell'assorbimento sotto gap e ha portato a ipotizzare che la riduzione della gap sia in dovuta alla formazione di una alta concentrazione di difetti. Gli stessi dati mostrano anche la presenza, ad energie appena inferiori alla gap, di una coda esponenziale di assorbimento con una energia caratteristica sostanzialmente indipendente dalla stechiometria. Questa coda potrebbe avere un ruolo molto importante nel determinare le prestazioni dei dispositivi fotovoltaici e sarà oggetto di ulteriori indagini.

Parallelamente allo studio delle proprietà ottiche, è stato affrontato il problema dell'effetto della stechiometria sulle proprietà microstrutturali dei film. A tal fine sono state effettuate misure di XRD, su diversi campioni di CZTS con diversi contenuti di stagno. Gli spettri acquisiti sono stati analizzati per ottenere informazioni sui parametri di cella e sull'occupazione del sito dello stagno. Sono state inoltre eseguite delle misure di XRD alla linea MCX del sincrotrone ELETTRA a Trieste, utilizzate per studiare le dimensioni dei domini cristallini in campioni con diverse stechiometrie. Questo studio ha prodotto interessanti risultati che evidenziano dimensioni maggiori dei domini cristallini in campioni con più alto contenuto di stagno, in accordo con il miglioramento della morfologia evidenziato dal SEM. È attualmente in studio la possibile correlazione tra le proprietà microstrutturali e il

comportamento ottico dei film, in particolare il possibile contributo dei difetti a bordo grano all'aumento dell'assorbimento ottico sotto gap nei campioni a basso contenuto di stagno.

Ottimizzazione della stechiometria e della struttura dei precursori

I materiali preparati da precursori depositati per evaporazione e-beam sono stati ulteriormente ottimizzati per migliorare le prestazioni dei dispositivi fotovoltaici. Dopo aver effettuato una nuova calibrazione dei rate di evaporazione per migliorare il controllo sulla stechiometria dei precursori, un primo miglioramento è stato ottenuto riducendo il contenuto di zinco, che, come evidenziato dai profili XPS e GD-OES, tende a segregare sul retro del film. Sono state inoltre effettuate alcune prove cambiando la struttura dei precursori, variando cioè la distribuzione dei diversi strati, per ottenere dei miglioramenti in termini di morfologia del materiale. Inizialmente, infatti, con lo scopo di migliorare l'omogeneità nella distribuzione dei metalli, i precursori erano stati preparati secondo la struttura ZnS/Sn/Cu/ZnS/Sn/Cu/ZnS, dividendo su più strati i singoli materiali. Tuttavia, questo tipo di struttura può dar luogo anche a eventuali *cluster* di ZnS dispersi lungo tutto lo spessore del film, che possono bloccare la crescita dei grani durante la solforizzazione. A fronte di questa ipotesi, sono stati testati nuovi precursori depositando tutti i materiali in un unico layer, secondo la struttura più semplice ZnS/Sn/Cu. Questa nuova struttura dei precursori, insieme all'ottimizzazione della stechiometria ottenuta con una riduzione di zinco, ha prodotto dei materiali assorbitori molto migliori rispetto a quelli ottenuti con lo stesso tipo di processo utilizzato nella scorsa annualità.

Il miglioramento della morfologia e della stechiometria ha anche portato a un primo miglioramento dell'efficienza delle celle rispetto a quelle prodotte nella passata annualità, passando dal 2,45% al 3,2% come mostrato in Figura 163. Nonostante il miglioramento nelle prestazioni, resta tuttavia il problema della scarsa riproducibilità riscontrata nei dispositivi ottenuti con questo processo di fabbricazione.

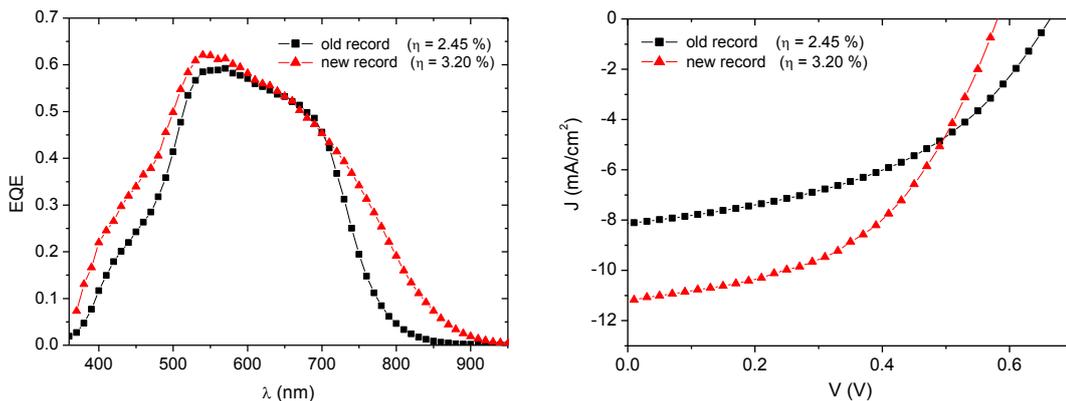


Figura 163 .Risposta spettrale e caratteristica I-V della migliore cella a base di CZTS ottenuta da precursori e-beam. Le curve sono confrontate con quelle del vecchio record raggiunto lo scorso anno con lo stesso processo di crescita

d.2 Crescita del CZTS da precursori depositati per co-sputtering

I precursori sono stati cresciuti nello sputtering Oerlikon-UNIVEX 450B acquisito nelle scorse annualità e recentemente migliorato per avere la possibilità di operare in co-sputtering. L'uso del co-sputtering dei tre solfuri metallici (CuS, SnS e ZnS) senza riscaldamento del substrato garantisce un maggior controllo e una maggiore riproducibilità nella deposizione rispetto alla tecnica precedente. Si ottiene così un precursore in cui lo zolfo è già presente in quantità quasi stechiometrica e in cui i tre metalli sono omogeneamente distribuiti su tutto lo spessore. Dalle caratterizzazioni ottiche e strutturali (Trasmittanza, Raman, XRD) si deduce che il precursore ha una struttura cristallina equivalente a quella della kesterite, ma è caratterizzato da un completo disordine cationico e grani molto piccoli.

La prima parte del lavoro è stata dedicata alla calibrazione dello strumento, necessaria per ottenere una relazione tra le condizioni di sputtering (pressione di Ar, tempo di deposizione, potenza applicata) e i rapporti molari dei tre solfuri. Note quindi le rette di calibrazione che legano il *rate* di deposizione dei singoli solfuri alla potenza applicata, si è provato a riprodurre precursori con composizione simile a quella ottimale nota in letteratura.

Le misure di EDX e XRF, svolte in collaborazione con le Università di Roma e Trento, hanno però messo in evidenza una discrepanza tra l'effettiva composizione misurata e quella nominale stimata con le rette di calibrazione. Infatti, studi più approfonditi hanno evidenziato che i rate di crescita dei singoli composti binari non sono costanti nel tempo e che la loro somma non coincide con l'effettivo rate di crescita del materiale quaternario.

Si è perciò continuato ad ottimizzare il processo su basi empiriche per correggere la stechiometria dei precursori. Quest'aggiustamento della composizione ha portato ad un notevole aumento dell'efficienza da circa 1 al 4,3%. In particolare le misure di composizione suggeriscono l'importanza di mantenere il rapporto rame/stagno vicino (o al limite leggermente inferiore) al valore stechiometrico di 2.

Dopo aver lavorato sulla composizione, si è anche provato a ridurre lo spessore del materiale, cosa che ha subito portato a un ulteriore aumento dell'efficienza da 4,3 a 5,6%. In Figura 164 è riportato il confronto tra la caratteristica I-V e la risposta spettrale dei dispositivi di prima e seconda generazione.

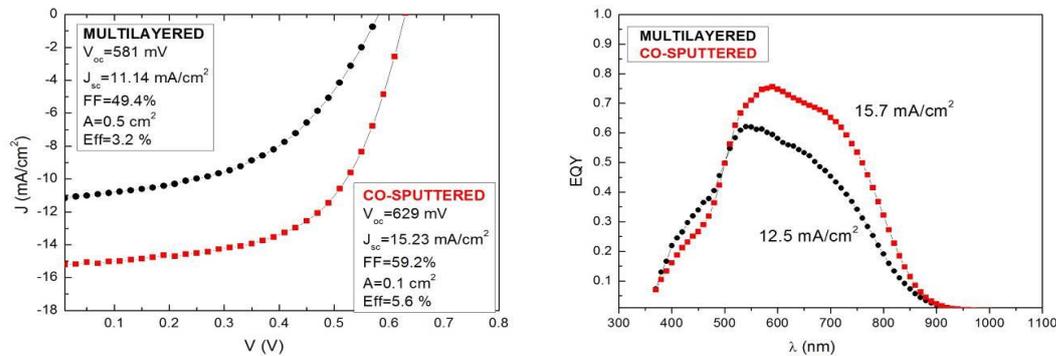


Figura 164. Confronto della caratteristica I-V (destra) e della risposta spettrale (sinistra) tra le due tipologie di celle

L'omogeneità e la composizione dei precursori sono state inoltre verificate con misure di XPS. In Figura 165 è mostrata, a destra, la foto SEM della sezione di un precursore depositato su Mo e, a sinistra, il relativo profilo di composizione, che evidenzia una buona omogeneità lungo lo spessore ma una concentrazione di Zn eccessiva rispetto a quella prevista.

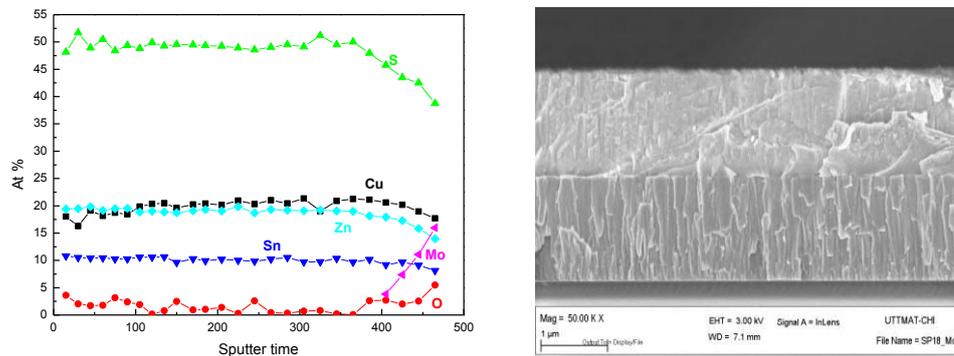


Figura 165. Profili di composizione da misure XPS (a sinistra) e foto SEM in sezione (a destra) del precursore

Si era pensato che, per essere trasformati in CZTS, i precursori co-sputterati potessero essere sottoposti ad un trattamento termico differente rispetto a quello dei precedenti precursori. Infatti, dal momento che nel precursore è già presente zolfo in quantità quasi stechiometrica ed il materiale ha già una struttura cristallina simile al CZTS, si supponeva che fosse sufficiente un trattamento più breve ed un apporto di zolfo molto minore (o addirittura nullo) per far crescere i grani e riordinare la distribuzione cationica. In realtà è stato osservato sperimentalmente che i campioni sottoposti a trattamento termico con un apporto ridotto di zolfo danno pessimi risultati in termini di efficienza. I risultati migliori sono ottenuti invece mantenendo lo stesso processo di solforizzazione, ottimizzato per i precedenti precursori, che prevede un *annealing* in presenza di zolfo. Un'ipotesi plausibile è che l'alta pressione dei vapori di zolfo durante la solforizzazione contribuisca a mantenere la corretta stechiometria del materiale.

Misure di XPS sono state ripetute anche sul campione finale solforizzato. I profili riportati in Figura 166 mostrano che i campioni ottenuti da precursori co-sputterati presentano un'omogeneità lungo lo spessore notevolmente migliore di quella ottenuta da precursori *stacked* evaporati.

Ulteriori prove di solforizzazione sono state condotte sostituendo il forno a tubo con un forno RTP (Rapid Thermal Processing), che permette non solo di ridurre i tempi necessari per l'intero ciclo termico (riscaldamento e raffreddamento), ma anche di ottimizzare il profilo di temperatura consentendone delle rapide variazioni. Tuttavia

non è ancora stato trovato un profilo adeguato per riprodurre o superare i risultati ottenuti con il forno a tubo. L'attuale efficienza con l'utilizzo del forno RTP con questi precursori è solo dell'1%.

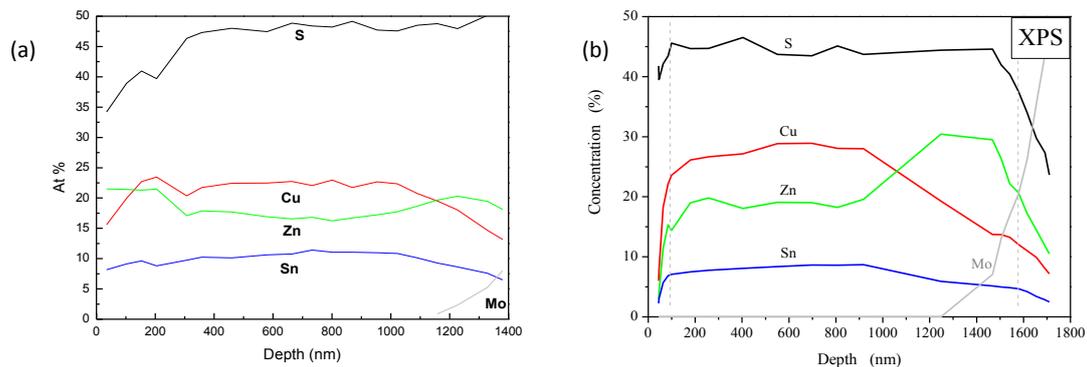


Figura 166. Profili di composizione da misure XPS di un campione di CZTS ottenuto da un precursore co-sputterato (a) e da un precursore stacked evaporato (b)

d.3 Sviluppo delle altre tecniche di deposizione

Nel corso della annualità c'è stato un cambiamento radicale nel processo di fabbricazione dei dispositivi fotovoltaici, dovuto ad un up-grade delle strumentazioni. Questo cambiamento ha interessato non solo la crescita del CZTS, ma anche la deposizione dei contatti (Mo e ZnO:Al). Parte dell'aumento di efficienza è dovuta anche ad un miglioramento dei contatti in termini di proprietà elettriche, ottiche e meccaniche.

Deposizione dello ZnO con il nuovo sputtering

Le celle ENEA in CZTS utilizzano come contatto frontale uno strato fortemente conduttivo di ZnO drogato con il 2% di Al₂O₃ (AZO) depositato su un sottile strato di ZnO intrinseco. L'utilizzo di questo strato intermedio di ZnO tra il CdS e l'AZO consente di ridurre la resistenza di shunt dei dispositivi. Inizialmente entrambi gli strati venivano depositati per RF-sputtering utilizzando il sistema UNIVEX 450B della Oerlikon, ma non si era riusciti ad avere una resistività inferiore a $4 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$. Tuttavia è noto dalla letteratura che è possibile ottenere materiali anche dieci volte più conduttivi con ovvi effetti positivi sulla resistenza serie e sul fill factor delle celle. Nel dicembre 2012 si è passati all'utilizzo del nuovo sputtering in linea della Kenosistec, nel quale la deposizione dello ZnO intrinseco avviene per RF sputtering, mentre quella dell'AZO avviene in DC.

E' stato ovviamente necessario ottimizzare nuovamente i parametri di processo (temperatura del substrato, potenza e pressione). Dopo numerose prove, ci si è stabilizzati sul seguente set di parametri di processo:

- ZnO intrinseco: $T_{\text{sub}}=150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Par}=5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$, $P_{\text{RF}}=200 \text{ W}$
- ZnO:Al (AZO): $T_{\text{sub}}=150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Par}=8 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$, $P_{\text{DC}}=450 \text{ W}$.

Con questi parametri un bilayer di questi materiali spesso 550 nm ha una $\rho_{\text{sh}}=30 \Omega/\text{sq}$, corrispondente a $\rho=1,6 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm}$.

È stato osservato che la presenza dello strato di ZnO intrinseco contribuisce a migliorare la conducibilità dell'AZO. Questo potrebbe essere dovuto a un miglioramento della morfologia dello ZnO drogato, quando viene cresciuto su un "seme" di ZnO intrinseco depositato a bassa potenza. Inoltre si è visto che la conducibilità e la riproducibilità dell'AZO migliorano sensibilmente migliorando la purezza dell'atmosfera di sputtering. Infatti parte del miglioramento della conducibilità dell'AZO è stato ottenuto ottimizzando la tenuta delle linee di gas (sostituite con nuove linee in acciaio). È inoltre previsto un upgrade del sistema tramite l'installazione di una camera di load-lock, utile per ridurre l'esposizione all'aria della camera di deposizione.

Sono attualmente in corso degli esperimenti per ottenere ulteriori miglioramenti della conducibilità dell'AZO, introducendo nel gas di sputtering (argon) una piccola percentuale di idrogeno e variando la temperatura di deposizione. I risultati ottenuti fin ora mostrano che la resistività diminuisce con l'aumentare della temperatura, indipendentemente dalla presenza dell'idrogeno durante la deposizione. Le più basse resistività (circa $7 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm}$) si sono ottenute a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, ad alta percentuale di idrogeno (4%). A parità di idrogeno (4%), ma a bassa temperatura ($150 \text{ }^\circ\text{C}$), i film mostrano comunque una buona resistività (inferiore a $10^{-3} \Omega \text{ cm}$) ma risultano opachi ($T_{\text{max}}=75\%$). Questo potrebbe essere dovuto ad un processo di riduzione dell' AZO in presenza di alte concentrazioni di H₂ e al conseguente eccesso di atomi di Zn probabilmente situato nelle regioni di bordo grano. Questi risultati preliminari

mostrano che, utilizzando l'idrogeno, si possono ottenere film nettamente più conduttivi di quelli in uso attualmente: nella prossima annualità verranno provati nei dispositivi completi.

Deposizione del Molibdeno per DC-Sputtering

L'ottimizzazione dello strato di molibdeno è molto importante per avere una buona adesione del CZTS e garantire la qualità del contatto elettrico nei dispositivi. Come noto dalla letteratura, strati di molibdeno porosi, depositati a più basse pressioni di sputtering, mostrano buone proprietà di adesione su vetro, ma l'elevato valore della resistività non permette un buon contatto ohmico nei dispositivi. Viceversa, i *layer* di molibdeno depositati ad alte pressioni di sputtering, pur avendo una scarsa adesione su vetro, hanno una maggiore compattezza e mostrano una conducibilità elevata. Tipicamente il contatto di molibdeno viene quindi ottimizzato secondo una struttura che prevede un doppio strato, il primo poroso e il secondo compatto, per garantire contemporaneamente sia una buona adesione che una buona conducibilità.

Dopo l'acquisizione del nuovo sistema di sputtering in DC, è stato ottimizzato il processo di deposizione del molibdeno per ottenere un contatto ohmico con le caratteristiche volute. A tal fine è stato affrontato lo studio delle proprietà elettriche e strutturali di diversi layer di molibdeno, depositati con diverse condizioni sperimentali, variando sia la pressione che la corrente di sputtering. I film sono stati caratterizzati con misure di resistività, XRD e SEM, che hanno permesso di studiarne le proprietà ottiche, strutturali e morfologiche. Lo strato superiore del molibdeno è stato anche ottimizzato in modo da garantire una buona adesione con il CZTS. I risultati migliori sono stati ottenuti con un *bilayer*, dove il primo strato poroso viene depositato a $5 \cdot 10^{-2}$ mbar con una corrente di sputtering di 1 A, mentre il secondo layer, più compatto e più spesso, viene depositato a $5 \cdot 10^{-3}$ mbar, aumentando la corrente di sputtering a 1.45 A. La foto SEM del film finale è riportata in Figura 167, dove si evidenzia la diversa morfologia dei due singoli strati. Lo strato sottile che si vede in superficie è stato identificato come solfuro di molibdeno, che si forma a seguito del trattamento di solforizzazione a cui sono sottoposti i precursori depositati sopra al contatto ohmico.

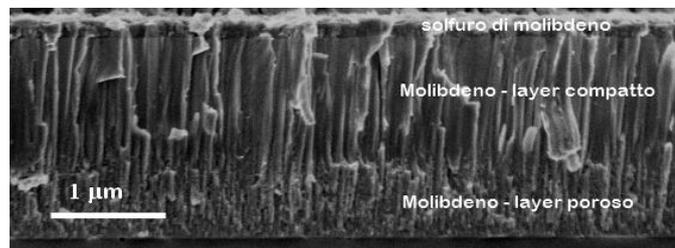


Figura 167. Foto SEM della sezione di un bilayer di molibdeno ottimizzato in ENEA. Nella foto sono ben visibili i due diversi strati, distinguibili per la diversa morfologia

Crescita del CZTS da soluzioni

Un'ulteriore tecnica investigata per la crescita del CZTS consiste nella deposizione dei precursori da fase liquida. Uno dei problemi principali riscontrati nella scorsa annualità era stata la scarsa riproducibilità dei materiali, dovuta principalmente a problemi di stabilità delle soluzioni.

Il lavoro principale svolto durante questa annualità è stato l'ottimizzazione delle soluzioni per aumentarne la stabilità, con lo scopo di migliorare il controllo della stechiometria dei campioni finali. A tal fine sono state prodotte diverse soluzioni, in cui sono stati utilizzati cloruri di rame, zinco e stagno come fonti metalliche e tiourea come sorgente di zolfo. La prima parte del lavoro è stata dedicata alla ricerca di solventi in grado di dissolvere sia i cloruri metallici che la tiourea. È stata inoltre studiata l'influenza della sorgente di stagno, cambiando la natura del corrispondente cloruro (passando dal cloruro anidro a quello pentaidratato). Sono, infine, stati testati diversi trattamenti termici, al fine di evitare l'utilizzo dello zolfo durante il processo di ricristallizzazione.

Le caratterizzazioni EDX, XRD e Raman sui campioni ottenuti utilizzando diversi solventi mostrano che, impiegando una combinazione di metanolo e glicole etilenico, si riesce ad ottenere un ottimo controllo sia della stechiometria che della struttura. Tuttavia, le proprietà ottiche non risultano ancora ottimali a causa della scarsa qualità superficiale dovuta all'elevata rugosità e alla presenza di *voids*. Sono attualmente in corso gli esperimenti per limitare la presenza di *voids* all'interfaccia con il molibdeno (migliorando così anche l'adesione) e per ottimizzare la qualità superficiale dei film con un processo che prevede la combinazione del *dip-coating* con lo *spin-coating*. Parallelamente alla deposizione via sol-gel, è stato recentemente messo a punto un metodo di *hot-injection* per la produzione di inchiostri a base di nanoparticelle. Questo processo dovrebbe portare a un netto miglioramento delle qualità superficiali dei film, migliorandone le prestazioni come strati assorbitori.

In conclusione si può affermare che quanto previsto all'obiettivo d è stato pienamente raggiunto. Utilizzando il CZTS ottenuto mediante co-sputtering dei precursori, è stata misurata sul dispositivo un'efficienza massima del 5,6%. Si prevede di proseguire il lavoro di ottimizzazione dei dispositivi. L'aggiustamento della stechiometria del materiale e l'utilizzo di un AZO più conduttivo garantiranno certamente un sensibile aumento dell'efficienza. È stato inoltre già acquistato un target singolo di CZTS (prodotto appositamente su specifiche ENEA) per provare a sviluppare una tecnica di deposizione più semplice e riproducibile del co-sputtering. Per la parte riguardante la

deposizione da fase liquida, si prevede di provare ad utilizzare una macchina da deposizione prototipale sviluppata da due ditte italiane (Rise Technology S.r.L. e 2BG S.r.L.) che è attualmente nelle fasi finali di costruzione.

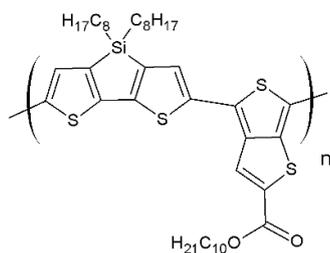
e. Sviluppo di celle organiche

Presso il Centro Ricerche ENEA di Portici, negli ultimi anni, è stato messo a punto un processo per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche. Il cuore del laboratorio è costituito da un sistema glove-box con evaporatore termico integrato che consente di condurre tutti gli step di processo in atmosfera controllata e quindi permette di realizzare dispositivi evitando il degrado dei materiali. Recentemente, sfruttando le facility acquisite negli anni precedenti, sono state sviluppate celle fotovoltaiche polimeriche aventi come materiale attivo una blend di un copolimero benzoditiofene-tienotiofene e un derivato del fullerene C70. Sono state affrontate le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi. I migliori dispositivi (non incapsulati) hanno raggiunto un'efficienza di conversione del 6,3% ma si prospettano margini di miglioramento caratterizzando gli stessi in un ambiente controllato.

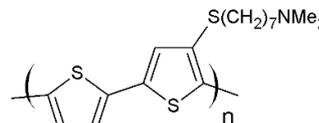
L'attività svolta nel corso della presente annualità ha riguardato sia lo sviluppo di nuovi materiali polimerici (con strutture simili a quelle che in letteratura mostrano i migliori risultati in termini di prestazioni dei dispositivi finali) che il loro testing come materiali attivi per celle fotovoltaiche organiche. Inoltre sono state sperimentate strutture ad elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali attivi esistenti e sviluppati. Infine è stato avviato uno studio sulla stabilità di tali dispositivi al fini di determinare i fattori limitanti e migliorare la comprensione del funzionamento delle celle.

e.1 Sintesi di nuovi materiali polimerici per celle solari organiche

Il Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia si è occupata della sintesi di nuovi polimeri semiconduttori con caratteristiche strutturali potenzialmente idonee per l'utilizzo in celle solari organiche. Sono state svolte attività di ricerca concernenti la sintesi dei seguenti copolimeri:



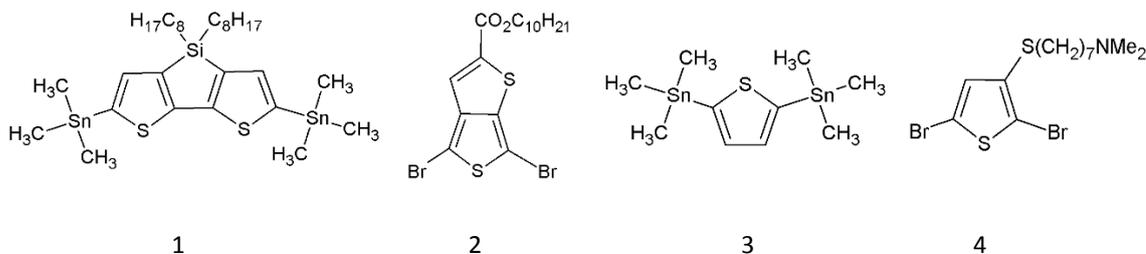
Polisilolo



Politiofene

Il primo verrà utilizzato come componente donatore mentre il secondo come interstrato nella costruzione di celle solari organiche.

Per ottenere questi copolimeri si utilizza l'accoppiamento di Stille tra un comonomero stannilato e un comonomero bromurato in presenza di un catalizzatore al palladio. I comonomeri utilizzati sono stati i seguenti:



I prodotti ottenuti sono stati caratterizzati tramite risonanza magnetica nucleare ^1H e ^{13}C (NMR) mono e bidimensionale e, nel caso dei polimeri, spettroscopia IR, spettroscopia UV-Vis e cromatografia di permeazione su gel (GPC) (almeno nel caso del polisilolo, perché il politiofene con la funzione amminica non è solubile in tetraidrofurano).

Parallelamente l'ENEA si è occupata di testare i polimeri, mostrati in Figura 168, sintetizzati nell'annualità precedente come materiali attivi per celle fotovoltaiche organiche.

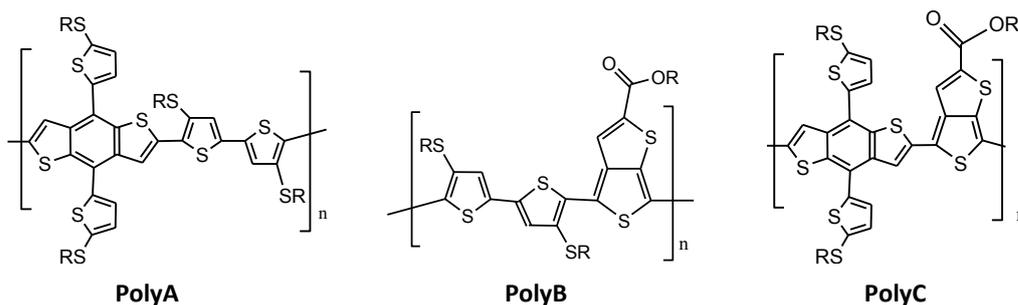


Figura 168. Polimeri a base tiofenica sintetizzati dall'unità di ricerca dell'Università di Modena e Reggio Emilia, brevemente indicati con PolyA, PolyB e PolyC. Per tutti i polimeri R= C₈H₁₇

I polimeri sono stati testati come materiale elettrone donatore in celle fotovoltaiche polimeriche con la struttura: glass/ITO/PEDOT:PSS/**PolyX**:[70]PCBM/Ca/Al (X=A, B, C). Come materiale elettrone accettore è stato utilizzato il derivato fullerenico [70]PCBM. Lo strato fotoattivo è stato preparato per spin coating partendo da una miscela 1:1 polimero:fullerene sciolta in 1,2-diclorobenzene. Lo spessore ottimale è risultato essere di circa 80 nm. I dispositivi sono stati preparati in atmosfera inerte (glove box) e caratterizzati tramite misure di efficienza quantica esterna e corrente-tensione (I-V) sotto simulatore solare (AM1.5G, 100 mW/cm²).

Le efficienze di conversione ottenute sono di poco superiori all'1%, anche se ci sono elementi promettenti per un rapido miglioramento. I dettagli dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/012.

e.2 Realizzazione di strati attivi aventi morfologie con un elevato grado di ordine

In collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli "Federico II", sono stati sviluppati nanocompositi ibridi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati e di nanoparticelle metalliche con l'obiettivo di studiare la possibilità di fabbricare film polimerici da utilizzare come elemento attivo in celle fotovoltaiche. In particolare l'Università ha sviluppato e caratterizzato i nanocompositi, mentre in ENEA si è dato avvio all'attività per il loro utilizzo in dispositivi. I copolimeri a blocchi (BCPs) consistono in macromolecole distinte di due o più omopolimeri, covalentemente legate e che tendono a segregare in microdomini distinti a causa delle loro mutue repulsioni. Questo genera la formazione spontanea di nanostrutture che possono essere sfruttate in molte applicazioni, in particolare per diverse tecnologie su film sottile. I microdomini dei BCPs nanostrutturati (sfere, cilindri o lamelle) formati spontaneamente per self-assembly possono agire da host per sequestrare nanofiller di appropriata affinità chimica e geometrica producendo un ordine a lungo raggio nel posizionamento delle nanoparticelle. In questo modo è possibile realizzare nanocompositi con proprietà fisiche speciali. La grande innovazione di questi studi consiste nel fatto che l'utilizzo come matrice di copolimeri a blocchi, quindi materiali già nanostrutturati, invece di omopolimeri, offre l'importante opportunità di controllare la distribuzione spaziale e orientazionale dei nanofiller. Le nanoparticelle attive, che inducono proprietà specifiche, non sono, infatti, distribuite a caso nella matrice polimerica ma sono sequestrate nei microdomini ordinati e, quindi, distribuite in modo ordinato nella matrice: questo permette un maggiore controllo delle proprietà fisiche finali dei nanocompositi e lo sviluppo di proprietà a volte inattese.

I BCPs sono, quindi, materiali ideali per agire da "impalcatura" nell'ingegneria di nuovi nanocompositi, dove la distribuzione di particelle guest è guidata dall'ordine della matrice host. Questo genera un assemblaggio gerarchico di nanostrutture ibride organico-inorganico (polimero-metallo) in cui un livello di self-assembly guida il successivo. Il completo sviluppo dei copolimeri a blocchi per applicazioni industriali nel campo delle nanotecnologie richiede, tuttavia, ordine su larga scala e precisa orientazione dei nanodomini, e, inoltre, infiltrazione selettiva di nanoparticelle in microdomini specifici delle nanostrutture.

L'attività di ricerca è stata rivolta allo studio di nanocompositi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati come matrice per l'infiltrazione selettiva di nanoparticelle di oro e dei metodi per indurre ordine nella distribuzione delle particelle di oro e generare nanostrutture metalliche ordinate. È stato impiegato un copolimero a blocchi simmetrico di poli(stirene-b-polimetilmetacrilato) PS-b-PMMA che, attraverso fenomeno di self-assembly, ha dato origine a nanostrutture di tipo lamellare caratterizzate da domini di PS alternati a domini di PMMA. La morfologia ideale caratterizzata da domini lamellari orientati perpendicolarmente rispetto alla superficie del substrato è stata ottenuta grazie all'impiego di un substrato trasparente e conduttivo, l'ITO, caratterizzato da una superficie neutra che non ha dato luogo ad interazioni preferenziali con i domini di PS e PMMA. A partire da questa nanostruttura è

stato poi realizzato un nanocomposito ibrido mediante incorporazione selettiva di nanoparticelle di oro all'interno dei domini di PS. In particolare è stato sviluppato un metodo semplice ed innovativo che si basa su un processo di evaporazione termica di oro e successiva condensazione sulla superficie del film in alto vuoto. Il successivo trattamento di annealing a 150 °C in vuoto, a temperatura superiore della T_g del polimero, ha indotto una diffusione spontanea degli atomi del metallo verso i microdomini preferenziali di PS, con formazione di uno speciale nanocomposito caratterizzato da una matrice polimerica nanostrutturata ed alta dispersione di nanoparticelle di oro selettivamente incluse nelle lamelle verticali di PS. L'applicazione di campi elettrici esterni durante il trattamento termico ha consentito di ottenere strutture ordinate con strati di PS e PMMA allineati lungo una stessa direzione e con nanoparticelle di oro incluse negli strati di PS. Il risultato finale è una disposizione ordinata di nanoparticelle metalliche. E' stato dimostrato che film di nanocompositi con questa struttura ordinata di nanoparticelle di oro possono essere utilizzati come substrati attivi per la spettroscopia Raman amplificata da superfici (SERS).

e.3 Studio dei meccanismi di degrado di celle fotovoltaiche a base organica

In collaborazione con il Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli "Federico II", è stato effettuato lo studio dei meccanismi di degrado di celle fotovoltaiche a base organica, allo scopo di incrementarne la durabilità ambientale. L'attenzione si è rivolta principalmente a celle solari realizzate con blend di polimeri e materiali organici a basso peso molecolare. Le celle sono state realizzate e caratterizzate in ENEA, mentre l'Università ha caratterizzato otticamente i materiali impiegati nelle celle e ha elaborato un software per la simulazione del comportamento ottico ed elettromagnetico di multistrati (per approfondire la tematica si rimanda al rapporto Rds/2012/014).

Sono stati utilizzati il poli(3-esiltiofene) (P3HT), un polimero coniugato conduttore, ed il phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM), un derivato del fullerene C60 (Figura 169). Nei dispositivi il rapporto in peso tra i materiali è stato mantenuto costante (1:1). Sono stati caratterizzati film dei singoli materiali e della blend (Figura 170), ricavando un'energia di gap per quest'ultima di circa 2 eV.

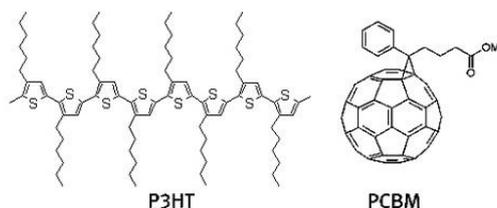


Figura 169. Struttura delle molecole di PH3T e di PCBM

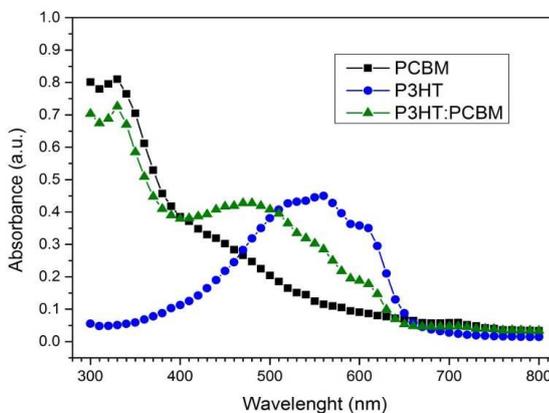


Figura 170. Spettro di assorbimento di film di P3HT, PCBM e P3HT:PCBM

La struttura delle celle fotovoltaiche realizzate è stata: vetro/ITO/PEDOT:PSS/blend/Ca/Al, con un'area di circa 0,8 cm².

I dispositivi sono stati caratterizzati subito dopo la loro fabbricazione mediante misure di efficienza quantica esterna (EQE) e registrando le caratteristiche I-V al buio e sotto luce (spettro AM1.5G). In Figura 171 sono mostrati gli andamenti della EQE e della I-V light per una delle celle. I parametri fotovoltaici per tale cella sono: efficienza (η) \approx 3,0 %, fill factor (FF) \approx 54,3 %, corrente di cortocircuito (J_{sc}) \approx 7,4 mA/cm², tensione di circuito aperto (V_{oc}) \approx 0,612 V. L'efficienza, il FF e la J_{sc} non sono molto elevati; la V_{oc} è invece analoga a quanto riportato in letteratura.

I dispositivi sono stati quindi incapsulati e sottoposti ad invecchiamento accelerato, tramite esposizione in camera climatica a temperatura ed umidità relativa (RH) fissate. Si sono scelti i valori di 65 °C e di 85% RH. Purtroppo, i dispositivi già dopo 24 ore di invecchiamento sono degradati completamente, non permettendo di effettuare ulteriori caratterizzazioni. Si ritiene che ciò sia stato causato da una procedura di incapsulamento non idonea che ha determinato un rapido degrado.

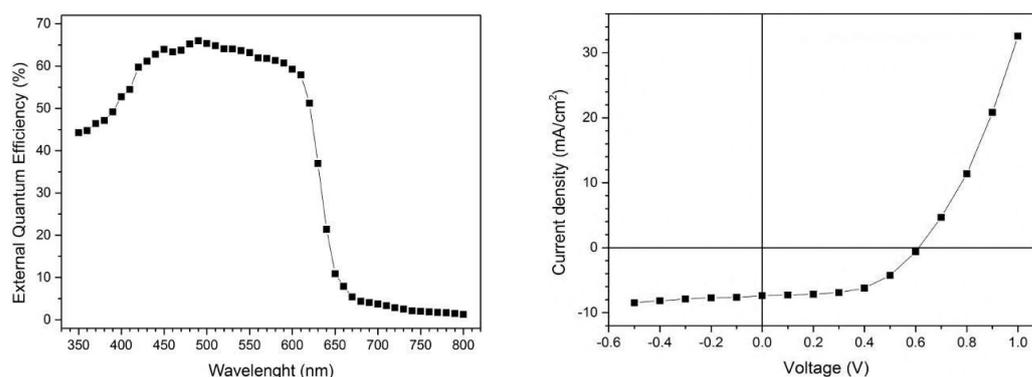


Figura 171. Efficienza quantica esterna (a) e caratteristica I-V (b) di una cella con blend P3HT:PCBM appena realizzata

Su celle non incapsulate, invece, è stato stimato il degrado valutando la variazione di efficienza quantica esterna nel tempo dopo alcuni trattamenti. In particolare, dopo l'esposizione alla luce del simulatore solare per 80 min il campione è stato lasciato a riposo in aria per 3 giorni. Dopodiché è stato posto in alto vuoto per 60 min. In Figura 172 è riportata la variazione dell'efficienza quantica esterna a seguito dei suddetti trattamenti subiti dalla cella solare con strato attivo di P3HT:PCBM. Dalla figura si può osservare che l'illuminazione del campione comporta un abbassamento del segnale. In particolare, il picco di efficienza quantica scende al 40% dopo l'irraggiamento.

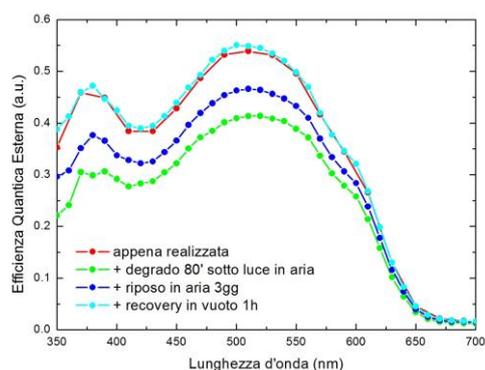


Figura 172. Efficienza quantica esterna per la cella P3HT:PCBM a seguito di diversi trattamenti

Il dispositivo recupera parzialmente in assenza di illuminazione e si ha un recupero completo dopo avere sottoposto il dispositivo ad un ciclo di vuoto. Questo comportamento si può spiegare se si osserva che il P3HT reagisce reversibilmente con l'ossigeno (Figura 173). Il trattamento sotto vuoto elimina l'ossigeno dal polimero ed il dispositivo recupera le prestazioni originali.



Figura 173. Schema della reazione reversibile tra ossigeno e politiofene

Infatti è noto che le prestazioni delle celle polimeriche in generale degradano rapidamente a causa dell'esposizione all'ossigeno o all'acqua. Ossigeno ed acqua presenti nell'aria diffondono nel dispositivo e, reagendo con i materiali dello strato attivo, causano una diminuzione delle prestazioni fotovoltaiche della cella. Lo sviluppo di un'adeguata procedura di incapsulamento potrà eliminare la causa principale del rapido degrado a cui vanno incontro le celle.

In conclusione si può affermare che le attività svolte sulle celle organiche sono perfettamente in linea con quanto previsto nel PAR 2012. Sono stati realizzati nuovi materiali polimerici, alcuni dei quali sono stati testati in dispositivi fotovoltaici. Le efficienze raggiunte sono piuttosto basse rispetto a quelle ottenute con materiali più convenzionali, ma ci sono elementi che fanno ritenere i materiali comunque promettenti. Inoltre la sintesi di nuovi

materiali è uno tra temi di ricerca ritenuti strategici nel contesto generale dello sviluppo di celle fotovoltaiche a base organica. Sono state inoltre sperimentate strutture ad elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali organici. Infine è stato avviato anche uno studio sulla stabilità dei dispositivi organici per determinare i fattori che limitano le prestazioni delle celle.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito delle attività previste dal tema di ricerca sono stati attivati accordi di collaborazione con diverse università. Nel seguito sono riportate le Università, il titolo del tema e una breve sintesi delle attività svolte.

Università di Genova, Dipartimento di Fisica

"Nanostrutture auto-organizzate con funzionalità bio-mimetica per fotonica e fotovoltaico"

L'attività ha riguardato lo sviluppo di processi di nanostrutturazione dei substrati allo scopo di indurre l'intrappolamento della radiazione solare nei dispositivi a film sottile di silicio (photon harvesting). Questo risultato è stato conseguito ricorrendo a trattamenti di nanostrutturazione all'interfaccia vetro-TCO volti a replicare gli effetti antiriflesso di sistemi bio-mimetici. La testurizzazione controllata dell'interfaccia di vetro è stata ottenuta tramite processi di erosione ionica auto-organizzata Ion Beam Sputtering - Ion Projection Lithography (IBS-IP). E' stato avviato anche lo sviluppo di approcci alternativi per la nanostrutturazione di substrati realizzando maschere stencil ottenute a partire da film metallici a basso costo anche con morfologie bidimensionali.

Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria

" Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare"

L'attività di ricerca ha riguardato la definizione di nuove architetture di dispositivo che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle a film sottile. E' stata condotta un'analisi numerica finalizzata allo studio di backreflectors ibridi metallo dielettrici in configurazione aperiodica. La piattaforma simulativa per le strutture aperiodiche è stata applicata per calcolare l'assorbimento dovuto alla presenza di backreflectors aperiodici, effettuando anche un confronto periodico-aperiodico per quanto riguarda l'aumento di assorbimento prodotto nei due casi. Sono state proposte e analizzate diverse configurazioni di celle solari allo scopo di identificare i casi più interessanti per la successiva sperimentazione eseguita utilizzando il Focused Ion Beam disponibile nei laboratori dell'ENEA.

Università "Federico II" di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione

"Modellazione ottica dello scattering di TCO testurizzati"

L'attività ha avuto lo scopo di sviluppare strumenti analitici e numerici per modellare efficacemente l'effetto della topologia superficiale di TCO testurizzati sulle prestazioni delle celle solari a film sottile. Il lavoro di modelling ottico ha previsto la definizione di un metodo analitico-sperimentale per la determinazione dell'indice di rifrazione complesso di ossidi trasparenti e conduttivi e la definizione di modelli numerici bidimensionali e tridimensionali per la valutazione della fotogenerazione in celle solari a film sottile sulla cui superficie sia presente un TCO di caratteristiche ottiche e geometriche assegnate.

Università "Federico II" di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione

"Analisi delle proprietà di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO prodotti per sol-gel"

L'attività ha riguardato lo studio e l'ottimizzazione delle condizioni di sintesi tramite tecnica sol-gel di film di ZnO per lo sviluppo di elettrodi frontali a basso costo per celle solari a film sottile. La procedura di preparazione di film di ZnO, sia non drogati che drogati con B o Al, è stata dettagliatamente studiata con particolare riferimento all'influenza del pH del mezzo di reazione su alcune specifiche caratteristiche dei film quali lo spessore, la morfologia, il livello di drogaggio e le proprietà ottiche.

Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione

"Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo e metallizzazioni per celle ad eterogiunzione silicio amorfo/silicio cristallino"

L'attività ha previsto la realizzazione e caratterizzazione di strati sottili di Indium Tin Oxide (ITO) e metallizzazioni per celle ad eterogiunzione silicio amorfo/silicio cristallino al fine di migliorare i contatti fra semiconduttore

amorfo e TCO o metallo. L'Università ha effettuato la valutazione delle funzione di lavoro degli strati conduttivi e ha inoltre curato la parte sulla simulazione dei dispositivi utilizzata nel processo di ottimizzazione dei materiali.

Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Fisica

“Caratterizzazione ottica di film sottili per dispositivi fotovoltaici basati su semiconduttori $Cu_2-II-IV-VI_4$ ”

Il lavoro, già avviato nelle scorse annualità, ha riguardato la caratterizzazione ottica e strutturale dei film di Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) con lo scopo di ottimizzare il processo di crescita dei materiali. Lo studio sistematico degli spettri di assorbimento dei film di CZTS ha consentito di correlare le variazioni di stechiometria del materiale con le variazioni della gap proibita, col grado di disordine del materiale e con il suo contenuto di difetti. Sono state, inoltre, effettuate misure di composizione dei materiali mediante tecnica EDX.

Università di Trento - Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali

“Crescita e caratterizzazione chimica, morfologica e strutturale di film sottili per celle fotovoltaiche a base di semiconduttori $Cu_2-II-IV-VI_4$ ”

L'attività si è sviluppata seguendo le seguenti due linee:

- Sviluppo di un processo di deposizione del CZTS da soluzioni contenenti i sali dei tre metalli e tiourea. Le caratterizzazioni mostrano che i campioni, dopo un trattamento ad alte temperature, possiedono buone caratteristiche in termini di composizione, assenza di fasi spurie e proprietà ottiche.
- Implementazione di nuovi metodi per l'analisi dei profili XRD di film di CZTS che hanno permesso, oltre alla tipica analisi strutturale, un'analisi quantitativa delle fasi spurie talvolta presenti nel materiale. Lo stesso procedimento di analisi ha anche permesso di ottenere informazioni sul livello di occupazione dei siti dello stagno che è risultato essere un parametro fondamentale per le caratteristiche optoelettroniche del CZTS.

Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Chimica

“Sintesi e caratterizzazione di nuovi polimeri semiconduttori per celle fotovoltaiche organiche”

Il lavoro svolto ha riguardato la sintesi di nuovi polimeri semiconduttori con caratteristiche strutturali potenzialmente idonee a migliorare le prestazioni fotovoltaiche delle celle solari organiche del tipo polimero-fullerene. Tali materiali sono stati caratterizzati mediante risonanza magnetica nucleare, cromatografia di permeazione su gel, spettroscopia infrarossa, spettroscopia UV-Visibile.

Università di Napoli - Dipartimento di Chimica

“Materiali nanostrutturati a base di copolimeri a blocchi per celle fotovoltaiche”

L'attività ha previsto lo sviluppo di un sistema ibrido innovativo in cui un copolimero a blocchi nanostrutturato è selettivamente caricato con nanoparticelle inorganiche conduttive. I copolimeri a blocchi hanno suscitato grande interesse nel campo delle nanotecnologie data la loro capacità di auto-organizzarsi in strutture aventi periodicità su scala nanometrica. Le nanostrutture ordinate possono essere utilizzate come matrici (host) per l'inclusione selettiva di molecole ospiti (guest) in specifici domini ottenendo così una dispersione ordinata e periodica delle nanoparticelle. In questo modo è possibile realizzare nanocompositi con proprietà fisiche speciali. Queste attività aprono, ad esempio, la strada verso la realizzazione di nuovi dispositivi organici con funzioni che dipendono esclusivamente dalle proprietà delle molecole ospiti.

Università di Napoli - Dipartimento di Fisica

“Analisi del degrado di materiali e di celle fotovoltaiche organiche indotto da stress termico”

È stato sviluppato un modello di comportamento ed il relativo software che lo implementa, basato sull'ambiente di calcolo Mathematica, che è in grado di calcolare gli spettri di riflessione e di trasmissione nell'intervallo UV-Vis-NIR per materiali multistrati, e la distribuzione del campo elettromagnetico all'interno del generico strato, se note alcune caratteristiche del materiale. Tramite questo programma si possono ricavare i valori o gli andamenti di alcuni parametri che descrivono il comportamento optoelettronico di un materiale o di un dispositivo. La procedura è, in particolare, utile quando applicata a spettri misurati su campioni che possono aver subito un invecchiamento o un degrado. Il programma può permettere di ricavare le modalità con cui i vari parametri del campione sono stati alterati dal degrado. Il programma è stato validato mediante l'applicazione a strati di materiali noti (nitruro di silicio ed ossido di silicio), mostrando un'ottima sensibilità.

È in corso di analisi la risposta del software applicandolo a strati di materiali organici utilizzati per celle fotovoltaiche. A tal fine sono stati misurati gli andamenti dell'assorbimento spettrale su film di P3HT e di PCBM, e della blend P3HT:PCBM, depositati su quarzo.

Energia elettrica da fonte solare Solare termodinamico

Le attività del progetto si inquadrano nell'ambito più generale dello sviluppo e diffusione dell'uso delle fonti rinnovabili di energia e si riferiscono in particolare alla produzione di energia elettrica da solare mediante tecnologia a concentrazione ad alta temperatura, "Solare Termodinamico". Questi impianti utilizzano opportuni sistemi ottici (concentratori) per raccogliere la radiazione solare e inviarla su un componente (ricevitore), dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido, può essere eventualmente accumulato o integrato con altra fonte esterna di energia (es. gas o biomassa), ed impiegato per la produzione di energia elettrica o come calore ad alta temperatura in processi industriali.

A seconda della forma dei concentratori, possiamo distinguere tre diversi tipologie di impianti: a disco parabolico, a torre centrale e a collettore lineare parabolici o Fresnel.

Allo stato attuale la tecnologia più diffusa è quella dei collettori parabolici lineari. In questo ambito l'ENEA ha sviluppato una propria originale linea tecnologica ad alta temperatura caratterizzata dall'utilizzo di sali fusi come fluido di processo e come mezzo di accumulo termico. La collaborazione con l'industria nazionale ha permesso di sviluppare una filiera industriale, portando, tra l'altro, alla realizzazione, da parte di ENEL, dell'impianto "Archimede" da 5 MW integrato con un ciclo combinato a gas (Priolo Gargallo, SR).

La ricerca sul solare termodinamico ha come obiettivo principale la riduzione dei costi per rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione elettrica con i tradizionali combustibili fossili. Questo può essere realizzato sia attraverso il miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi che con la semplificazione impiantistica ed il miglioramento delle procedure di gestione e manutenzione. L'attenzione deve essere posta, oltre che ai grossi impianti di produzione di energia elettrica, anche a sistemi di piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente ibridizzati con un'altra fonte energetica meglio se rinnovabile.

L'inserimento del solare termodinamico nel programma della Ricerca di Sistema Elettrico per il triennio 2012-2014 consente di affrontare in tale ambito alcune delle tematiche più promettenti per lo sviluppo della tecnologia. In particolare l'attività di ricerca proposta è finalizzata allo studio di configurazioni impiantistiche alternative a quelle attuali, allo sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia e a migliorare le prestazioni di un componente critico, come il tubo ricevitore.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività del progetto è finalizzata a:

- miglioramento delle prestazioni del tubo ricevitore con lo sviluppo di nuovi coating ad alta efficienza di conversione foto-termica;
- studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di differenti configurazioni impiantistiche per migliorare l'efficienza e produttività e per ridurre i costi di realizzazione e di esercizio. In particolare viene studiato l'utilizzo di differenti fluidi termici e lo sviluppo di nuovi sistemi di accumulo termico;
- sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia. In particolare verranno sviluppati sistemi innovativi multi-generativi sfruttando l'accoppiamento diretto con il sistema di accumulo termico a sali fusi ad alta temperatura.

Negli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, il tubo ricevitore è l'elemento fondamentale che svolge la funzione di assorbimento della radiazione solare concentrata e trasferimento del calore al fluido di processo. In particolare esso deve assorbire la maggiore quantità possibile di radiazione solare su di esso concentrata e, allo stesso tempo, deve disperdere verso l'ambiente esterno la minore quantità possibile del calore immagazzinato.

Nell'ottica di una ricerca volta ad ottenere prestazioni sempre più spinte del tubo ricevitore, grandi sforzi vengono condotti per ottenere un miglioramento dei parametri foto-termici del coating solare (incremento dell'assorbanza

solare e diminuzione delle perdite termiche per irraggiamento). Un aumento dell'1% dell'assorbanza e una riduzione dell'1% dell'emissività del coating porta ad un incremento dell'1,2% dell'energia termica raccolta e quindi ad una riduzione della dimensione del campo solare il cui costo incide per circa il 45-50% sul costo complessivo dell'impianto. Uno degli approcci più promettenti per il raggiungimento di questo importante risultato è rappresentato dall'impiego di coating solari a base di strati ceramici e metallici ad alta compattezza e densità. Questi possono essere ottenuti utilizzando la attuale tecnica di deposizione di sputtering magnetron, insieme alla tecnica IBAD (Ion Beam Assisted Deposition).

L'obiettivo principale dell'attività svolta nella presente annualità è stato quindi lo sviluppo di nuovi coating "solari" per tubi ricevitori, con la sostituzione della consolidata tecnologia del coating a base di strati "cermet" (nanocompositi ceramico-metallici) del tipo "graded" (contenuto metallico a decrescere con lo spessore) con la più innovativa tecnologia dei "filtri ottici di tipo interferenziale" a partire da stratificazioni di film sottili ceramici e metallici fabbricati con tecnica di deposizione del tipo sputtering opportunamente modificata. A questo scopo è stata apportata una modifica all'impianto di sputtering multicatodo del Centro ENEA di Portici con installazione di una sorgente a fascio ionico in camera di processo in prossimità di una delle "stazioni di sputtering".

E' stata condotta un'attività di progettazione ottica che ha avuto come obiettivo la simulazione di una serie di strutture multistrato dielettrico-metallo al fine di valutare i valori massimi teorici dei parametri foto-termici che si potevano ottenere e, lo studio della dipendenza delle prestazioni foto-termiche dalle proprietà ottiche dei materiali utilizzati. Questa attività ha dimostrato la grande potenzialità di questa innovativa tipologia di coating solari, che dovrà essere dimostrata dall'attività di sperimentazione. A questo scopo sono stati prodotti dei campioni, utilizzando la classica tecnica di sputtering, che costituiranno il riferimento per il processo di ottimizzazione degli stessi materiali prodotti con tecnica sputtering+IBAD.

Nell'ambito degli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, sono presenti due diverse configurazioni impiantistiche in funzione del fluido utilizzato nel campo solare per la raccolta del calore. La prima, quella più diffusa, riguarda impianti che utilizzano un olio diatermico (Therminol VP1), tossico e pericoloso per l'ambiente, che permette una temperatura massima di esercizio di circa 390 °C. La seconda tecnologia, sviluppata dall'ENEA, prevede invece l'utilizzo di una miscela di sali fusi (nitrato di sodio e potassio), alla base dei comuni fertilizzanti per l'agricoltura, non tossica e non dannosa per l'ambiente e che consente di raggiungere temperature operative di circa 550 °C.

L'attuale configurazione impiantistica di riferimento prevede impianti da 50 MW con doppio fluido termico: olio nel campo solare e sali fusi nel sistema di accumulo (es. impianti spagnoli tipo ANDASOL). La capacità del sistema di accumulo è in grado di garantire il funzionamento dell'impianto per circa 7,5 h in condizioni nominali anche in assenza di radiazione solare. Il sistema di accumulo è di tipo indiretto ed è presente uno scambiatore di calore olio/sali per il trasferimento del calore dall'olio ai sali e viceversa. Tale soluzione non consente di sfruttare tutte le potenzialità dei sali in quanto la temperatura massima dell'accumulo, 380 °C, è condizionata dalle caratteristiche dell'olio.

La tecnologia a sali fusi sviluppata da ENEA, date le più alte temperature di esercizio, oltre a migliorare il rendimento di conversione elettrica, consente di realizzare sistemi diretti di accumulo termico, in cui lo stesso fluido è utilizzato sia nel campo solare che nel sistema di accumulo. La più elevata temperatura (550 °C invece di 380 °C) permette inoltre di ottenere una capacità di accumulo sensibilmente più elevata, passando da 70 kWh/m³ nel caso di utilizzo dell'olio a 190 kWh/m³ con i sali fusi. E quindi a pari energia termica accumulata in un impianto ad olio la dimensione dell'accumulo aumenta del 175%.

Il sale fuso presenta però tra le sue caratteristiche un aspetto negativo rappresentato dall'alta temperatura di solidificazione (240 °C) e quindi, in ogni condizione operativa dell'impianto, il fluido deve essere mantenuto, con un adeguato margine, ad una temperatura superiore a questo valore. Il sale deve essere continuamente mantenuto in circolazione e questo comporta l'utilizzo di parte dell'energia termica accumulata per compensare le perdite termiche e la presenza di sistemi ausiliari di riscaldamento. Per risolvere questo problema l'attività di ricerca è orientata allo studio di miscele alternative che consentono il funzionamento a temperature inferiori della miscela binaria (fino a 120-150 °C), riducendo in questo modo le perdite termiche, migliorando la gestione e manutenzione dell'impianto, con una riduzione dei costi.

Per analizzare l'influenza del fluido termovettore sia sulle prestazioni che sui costi è stato preso in esame un impianto con potenza elettrica di 50 MWe, ed accumulo termico con capacità di 7 h, e sono state analizzate tre diverse configurazioni impiantistiche con differenti fluidi: olio, sale binario e sale ternario. Si è ipotizzato di localizzare l'impianto in Sicilia (è stata utilizzata la stessa curva di radiazione solare diretta dell'impianto Archimede). Per le tre differenti configurazioni è stata valutata l'energia elettrica prodotta, il rendimento di conversione dall'energia solare, i costi di installazione e quindi il costo dell'energia prodotta. E' stata ipotizzata anche la presenza di una integrazione fino al 15% (come permesso dal decreto sugli incentivi).

Un'alternativa ai fluidi termovettori liquidi è l'utilizzo di fluidi gassosi (CO₂, He, N₂, aria), che sono già stati presi in esame per gli impianti a torre e mai invece per gli impianti a collettori parabolici lineari. A questo scopo è stata quindi analizzata la possibilità di utilizzo di un gas come fluido termico all'interno dei tubi ricevitori di un impianto a collettori parabolici lineari. È stata definita la configurazione del campo solare in particolare la dimensione (lunghezza) e il numero di collettori da collegare in serie per costituire il modulo elementare di campo solare (stringa). La lunghezza ottimale della singola stringa di collettori è risultata di 200 m (rispetto ai 600-800 m degli impianti a sali). Per problemi termomeccanici sono da preferire collettori di 50 m rispetto agli standard 100 m e quindi la stringa sarà costituita da 4 collettori da 50 m collegati in serie. Non c'è grossa differenza tra i diversi fluidi per cui è stato scelto di utilizzare aria che comporta minori problemi, sia di approvvigionamento che di gestione. È stata quindi definita la pressione ottimale in funzione dei limiti dei componenti (tubo ricevitore). Sono stati studiati differenti cicli termici e valutata la relativa efficienza.

Negli impianti solari termodinamici, per sopperire alla naturale variabilità della fonte primaria di energia (radiazione solare), è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico, che rappresenta uno degli elementi base per ottenere una riduzione del costo dell'energia prodotta, poiché consente di migliorare il funzionamento dell'impianto, aumentare non solo la sua capacità operativa ma anche di dispacciamento con una migliore integrazione con la rete elettrica. Una soluzione alternativa all'accumulo a calore sensibile, sino ad oggi il più utilizzato, con ottime prospettive di riduzione dei costi è quella basata sullo sfruttamento del calore latente. Questo tipo di soluzione, che utilizza materiali a basso costo ed alta densità di energia, è però condizionata dalla loro ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). Sulla base di recenti studi, l'uso di materiali a cambiamento di fase (PCM) miscelati con opportune quantità di nano particelle sembrerebbe poter incrementare sia la capacità termica del mezzo che la sua diffusività.

L'ENEA, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia e con il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente dell'Università "Sapienza" di Roma, ha effettuato uno studio sulle soluzioni tecnologiche in grado di condurre a sistemi di accumulo termico per impianti solari termodinamici utilizzanti, come mezzo di accumulo, dei PCM, con particolare riferimento alla possibilità di incrementarne la capacità di accumulo e la diffusività termica attraverso l'aggiunta di piccole quantità di opportune nanoparticelle. Oggetto della presente attività è, quindi, lo sviluppo e la caratterizzazione di nuovi mezzi di accumulo termico, per temperature comprese tra 120 e 600 °C, che utilizzano una miscela di materiali a cambiamento di fase (PCM) con aggiunta di nano particelle. Tali mezzi, detti nano-PCM, costituiranno l'elemento cardine per lo sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico che siano più compatti di quelli attualmente in uso e potenzialmente di basso costo. Le attività hanno portato alla realizzazione e caratterizzazione di nuovi materiali a cambiamento di fase nanocaricati attraverso la selezione e caratterizzazione dei PCM di base e delle nanoparticelle da aggiungere agli stessi, nonché lo studio e sviluppo di metodi di miscelamento PCM-nanoparticelle in grado di assicurare la distribuzione ottimale dei singoli componenti.

Nell'ambito delle applicazioni del solare termodinamico a sistemi co-generativi di piccola e media taglia, l'ENEA ha sviluppato una tecnologia modulare TREBIOS (TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico), con integrazione di biomasse e di altre componenti rinnovabili. Questa filiera si basa sempre sull'utilizzo di una miscela di sali fusi sia come fluido di trasporto del calore prodotto dall'impianto solare a concentrazione, che come fluido di immagazzinamento dell'energia termica, utilizzando però un unico serbatoio di accumulo con il generatore di vapore integrato al suo interno. L'energia termica immagazzinata, sia quella prodotta dal campo solare che, a seconda delle esigenze, quella integrata da un riscaldatore di back-up alimentato con fonte esterna di energia (biomasse o altro), può essere utilizzata con continuità dai processi principali di produzione cui il sistema è asservito (energia elettrica, termica, produzione di freddo, sistemi di condizionamento, dissalazione, ecc.).

In questi impianti si evidenzia la necessità, specialmente per applicazioni in siti isolati dalla rete, di implementare generatori di corrente elettrica di piccole dimensioni basati sull'esclusivo uso di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo, come unità di emergenza di mantenimento al posto dei consueti generatori diesel di emergenza, con potenza fino a 30 kWe. Per studiare questi sistemi è stato utilizzato come sistema di accumulo termico il serbatoio presente nell'impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Il Progetto si articola in 4 obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità

Le attività espletate ricadono nel filone di studio e sviluppo di materiali, processi e tecniche di fabbricazione d'innovativi coating solari a tecnologia "filtri ottici di tipo interferenziale" per tubi ricevitori. Nell'ambito delle attività già espletate assume particolare rilievo la realizzazione dell'implementazione di un impianto prototipale di sputtering dell'ENEA sul quale è ora possibile condurre processi di deposizione di tipo Ion Beam Assisted deposition (IBAD). La nuova tecnologia dovrebbe consentire di migliorare non solo le prestazioni fototermiche del coating (alta assorbanza e bassa emissività), ma anche la durabilità ed affidabilità del componente.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sulle attività dell'obiettivo si rimanda al rapporto RdS/2013/076.

a.1 Studio e definizione dei componenti da acquisire e delle modifiche da apportare per l'implementazione della tecnica IBAD su di un preesistente impianto di sputtering multi-cadodo

Per quanto concerne i coating solari per tubi ricevitori da impiegare in impianti solari termodinamici di tipo *parabolic trough*, partendo dalla consolidata tecnologia basata su strati sottili cermet, tecnologia di cui ENEA è tra i leader mondiali, e con l'obiettivo di migliorare ulteriormente le prestazioni di conversione foto-termica, nello studio preliminare è stato studiato ed approfondito l'approccio promettente ed innovativo rappresentato dall'impiego di coating solari a base di strati ceramici alternati a strati metallici. In questo tipo di stratificazione grande importanza sull'efficacia foto-termica assume la qualità ottica del film metallico, strato che risulterà otticamente tanto più efficace quanto più le sue proprietà si approssimeranno a quelle del materiale di bulk. E' stata condotta un'analisi delle tecniche di deposizione (ALD, E-beam+IBAD, sputtering+IBAD) utilizzabili per ottenere strati sottili altamente compatti ed a bassa densità di difetti. Partendo dal presupposto che la tecnica principe utilizzata in ENEA per la fabbricazione dei rivestimenti solari spettralmente selettivi è la tecnica magnetron sputtering, e che questa tecnica si è dimostrata particolarmente adatta ad essere scalabile su impianti industriali di produzione, nella analisi sulle potenziali tecniche utilizzabili è sembrato piuttosto scontato scegliere e sviluppare un sistema di deposizione per film sottili metallici che abbinasse una convenzionale sorgente di sputtering ad una sorgente Ion Beam Assisted Deposition. Sebbene la scelta di integrare queste due sorgenti per depositare film metallici sottili ad alta densità e purezza sembrerebbe quella più ovvia, nello studio in oggetto si è dovuto tener conto che una serie di problemi possono complicarne l'applicazione a causa dei diversi parametri di deposizione delle due tecniche. Sono state studiate in modo approfondito le possibili difficoltà che si possono incontrare integrando due sorgenti dai parametri di processo così diversi tra loro ed è stata condotta un'attività di ricerca bibliografica per verificare, in primo luogo, la fattibilità di sottili strati metallici ad alta densità e purezza con la tecnica proposta e, quindi, per individuare le specifiche tecniche che la sorgente IBAD doveva possedere per rendere efficace il processo di deposizione. Terminata questa fase di studio, si è passati alla scelta della sorgente IBAD e alla fase di ideazione e progettazione delle modifiche da apportare ad un preesistente impianto di sputtering per rendere disponibile ed efficace la tecnica IBAD. Lo studio dello stato dell'arte della tecnica magnetron sputtering assistita da IBAD ha permesso di individuare una serie di parametri di sistema utili per scegliere la sorgente più idonea da montare sull'impianto di sputtering presente nei laboratori ENEA. In particolare, sono stati individuati gli intervalli più opportuni per l'energia del fascio ionico (<100 eV) e per l'angolo di puntamento (20° - 30°) per un efficace effetto di compattamento del materiale depositato.

La definizione delle specifiche tecniche della sorgente ionica ha permesso d'identificare una serie di ditte produttrici di sorgenti ioniche che avrebbero potuto fornire un prodotto utile allo scopo: GENCOA Ltd, CCR Technology GmbH, Kaufman & Robinson Inc (KRI). La scelta è ricaduta sulla sorgente EH200 della ditta KRI (di cui è riportata un'immagine in Figura 174) in quanto, oltre alle specifiche tecniche totalmente rispondenti ai nostri peculiari requisiti, ha pesato il fatto che le sorgenti ioniche della KRI sono tra le più diffuse al mondo e tra le più citate in pubblicazioni scientifiche e in brevetti con tipologie di applicazioni molto simili a quella ENEA.

Infine, bisognava scegliere il tipo di neutralizzatore da montare insieme alla sorgente ionica. L'analisi effettuata ha portato a scegliere il neutralizzatore di tipo "Hollow Cathode Electron Source" (HCES), preferito rispetto al filamento neutralizzatore standard in quanto in grado di garantire maggiore affidabilità e minore necessità di interventi di manutenzione oltre che un minore irraggiamento termico del substrato.



Figura 174. Sorgente ionica EH200 della KRI



Figura 175. Vista dell'impianto di sputtering multi-catodo dell'ENEA con evidenziata la sezione di deposizione

L'impianto di sputtering multi-catodo dell'ENEA di cui si volevano definire i componenti da acquisire ed le modifiche da apportare per implementare la tecnica IBAD, è un apparato prototipale in scala da laboratorio ad elevata flessibilità di configurazione, in grado di processare substrati tubolari (di diametro esterno da 70 a 100 mm e lunghezza 600 mm) e flat panel (di lunghezza max 1000 mm ed altezza max 380 mm). L'impianto è costituito, fondamentalmente, da due camere da vuoto (con relativi sistemi di pompaggio) disposte in serie e collegate mediante una valvola gate: la prima camera è destinata al caricamento/scaricamento e pretrattamento dei substrati; la seconda è la camera di processo, nella quale sono fabbricati i materiali sotto forma di film sottili con tecniche di deposizione di tipo sputtering. I substrati vengono

caricati e trasportati su un sistema carrello+pallet; nel caso di substrati tubolari la meccanica di movimentazione dell'impianto consente oltre il moto di traslazione anche lo spinning del substrato. In camera di processo si possono individuare tre zone: nel primo ed ultimo terzo della camera sono presenti due zone di parking del sistema carrello+pallet; nel terzo medio è presente la zona di deposizione vera e propria in cui sono presenti 6 flange verticali (3 per lato) predisposte per alloggiare device di vario tipo (quali elettrodi per processi di deposizione con particolare riferimento a catodi che fungono da "sorgenti" di sputtering). Nella Figura 175 è riportata una vista generale dell'impianto con evidenziata la sezione di deposizione.

La configurazione impiantistica e di processo della macchina è ascrivibile alla tipologia "in scansione": in camera di processo il substrato viene fatto traslare (e ruotare nel caso di substrato tubolare) davanti ai catodi, disposti verticalmente da entrambe le parti della sezione centrale della camera di processo.

L'idea di massima per realizzare l'up-grade IBAD dell'impianto descritto consiste, fondamentalmente, nell'installazione di una sorgente a fascio ionico in camera di processo in prossimità di una delle "stazioni di sputtering", sfruttando il fatto che delle 6 flange presenti nella sezione di deposizione della camera, solo 5 sono occupate da catodi per sputtering e, quindi, una sesta flangia risulta libera. La geometria (ingombro) e le caratteristiche fisiche (peso) della sorgente IBAD e del neutralizzatore individuati e sopra indicati sono compatibili per il montaggio, mediante un'interflangia opportunamente progettata, su questa flangia libera. Una meccanica di movimentazione dell'hardware IBAD (sorgente + neutralizzatore) opportunamente progettata risultava indispensabile per variare la configurazione geometrica del sistema, in termini di distanza e posizione angolare del cannone ionico rispetto al substrato processato.

a.2 Acquisizione, installazione e messa a punto della tecnica IBAD

Per l'espletamento delle pianificate attività di acquisizione, installazione e messa a punto della tecnica IBAD sull'impianto di sputtering prototipale multi-catodo dell'ENEA è stato attivato apposito Contratto di Appalto tra l'ENEA e la società Kenosistec S.r.l. (che aveva, in precedenza, curato la progettazione esecutiva su progetto preliminare dell'ENEA, la realizzazione e l'installazione presso il C.R. ENEA di Portici dell'impianto di deposizione in questione). L'intervento realizzato con l'appalto ha previsto una fase di studio preliminare in cui sono state sviluppate le idee di massima dell'ENEA (sub-task a.1) per realizzare l'up-grade d'impianto ad architettura IBAD. E' stata individuata la configurazione più idonea degli elettrodi (catodi magnetron, sorgente ionica con il neutralizzatore) e delle apparecchiature ad essi asserviti (principalmente generatori, flussimetri e valvole per immissione gas) in camera di processo; nella fattispecie è stata stabilita la posizione degli elettrodi in questione sulle 6 flange presenti nella zona centrale di deposizione della camera di processo con l'obiettivo di realizzare un efficace e corretto processo di assistenza del fascio ionico al processo di magnetron sputtering: il catodo standard magnetron alimentato da generatore DC impulsivo (già presenti sull'impianto) con installato il target del metallo che si vuole compattare doveva essere spostato ed affiancato al sistema cannone ionico + neutralizzatore (di nuova fornitura) per evitare seri problemi d'inquinamento e di affidabilità ed integrità dei componenti in fase di "fabbricazione materiali".

La ditta appaltatrice ha realizzato, come richiesto, la progettazione meccanica di un'interflangia per l'installazione della sorgente Kauffmann&Robinson EH200 e del neutralizzatore HCES e di una meccanica di movimentazione di questi componenti che, tenuti in conto gli stringenti vincoli geometrici e meccanici dell'impianto, fosse in grado di garantire la massima escursione angolare e la massima corsa in avvicinamento/allontanamento della sorgente e

del neutralizzatore rispetto al substrato processato. Da dati di letteratura, infatti, era precedentemente emerso che un efficace processo di assistenza con fascio ionico per il compattamento dei materiali depositati potrebbe comportare angoli d'inclinazione della sorgente e distanze sorgente/substrato diversi a seconda dello specifico materiale che si vuole fabbricare. L'escursione angolare che si è riusciti a realizzare è variabile da ortogonale a 45° rispetto al substrato, mentre la distanza del cannone ionico rispetto ad un tubo-substrato di 70 mm di diametro esterno è compresa fra 90 e 250 mm. La meccanica progettata e realizzata ha previsto soluzioni che consentono un'agevole movimentazione manuale esterna ("lato aria", cioè a portello della camera di processo chiusa e quindi con l'impianto in vuoto) del sistema sorgente + neutralizzatore per quanto riguarda la corsa di allontanamento/avvicinamento al substrato, e la rotazione e traslazione trasversale manuali "lato vuoto" (a camera "in aria") dei due elettrodi per IBAD.

Le soluzioni meccaniche progettate ed il layout generale d'impianto stabilito, vista la peculiarità della tecnica di deposizione che si voleva implementare, sono stati sottoposti agli esperti della ditta Kaufman&Robinson Inc. che hanno fornito parere tecnico positivo sulla idoneità funzionale dell'up-grade d'impianto ideato con lo scopo di condurre processi di magnetron sputtering assistiti da fascio ionico.

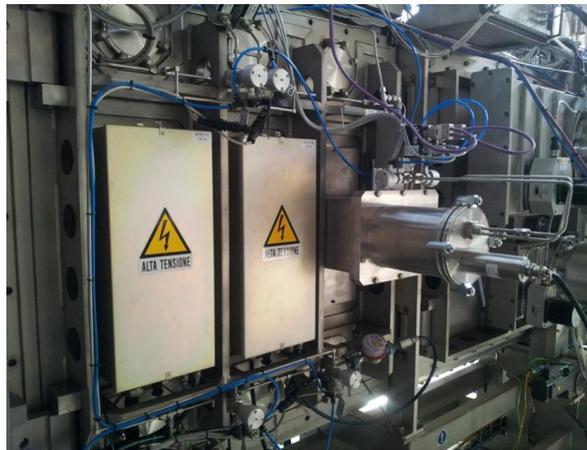


Figura 176. Sezione di deposizione dell'impianto ENEA con due catodi per sputtering affiancati, sulla destra, all'hardware IBAD di nuova installazione

I componenti meccanici speciali progettati, realizzati con lavorazioni meccaniche da vuoto condotte a regola d'arte, ed i componenti e materiali commerciali necessari all'up-grade sono stati installati da personale specializzato della Kenosistec sull'impianto di sputtering dell'ENEA. In Figura 176 si può osservare sulla destra l'hardware IBAD installato, come visibile dall'esterno (lato aria) della macchina di deposizione, con a fianco due catodi per sputtering.

In questa fase sono state apportate le adeguate modifiche hardware per realizzare il layout processistico stabilito (posizione della sorgente ionica con neutralizzatore e dei catodi per sputtering) e sono state realizzate le opportune modifiche ai quadri elettrici della macchina di deposizione per rendere possibile l'alimentazione, l'interfacciamento ed il controllo dei componenti e materiali di nuova installazione; tali modifiche alla parte elettrica dell'impianto erano state precedentemente stabilite mediante opportuna progettazione elettrica e revisione degli schemi elettrici e controllistici dell'impianto interessati dalle modifiche e implementazioni.

Oltre gli interventi sull'hardware dell'apparato di sputtering, sono state apportate opportune modifiche al software PLC di controllo e gestione dell'impianto e al software d'interfaccia uomo/macchina (HMI - Human Machine Interface). La nuova release del software HMI risulta *user friendly* per un esercizio della macchina di sputtering efficiente, flessibile oltre che ergonomico e sicuro. Tutte le funzioni ed i comandi del software originario (prima dell'up-grade) sono state pienamente conservate e risultano affidabili; è possibile controllare e gestire i componenti di nuova installazione (in tutte le loro potenzialità e parametri operativi) in modo simile ed integrato a quelli già presenti sull'impianto e soggetti a logiche di controllo e gestione analoghe. Ovviamente il debug del software del PLC e di gestione e HMI è iniziato durante la fase d'installazione e messa a punto dell'up-grade e continuerà, se le circostanze lo richiederanno, per tutto il periodo di garanzia dell'intervento realizzato. Nella Figura 177 è riportata, a titolo di esempio, la finestra del software HMI modificata da cui è possibile controllare e comandare manualmente l'alimentazione delle sorgenti di sputtering e del sistema cannone ionico+neutralizzatore per IBAD, oltre che gestire l'immissione gas e le pressioni di processo. Il software prevede la possibilità di effettuare processi standard ed IBAD sputtering in modo automatico da ricette di deposizione multi-step opportunamente compilate.

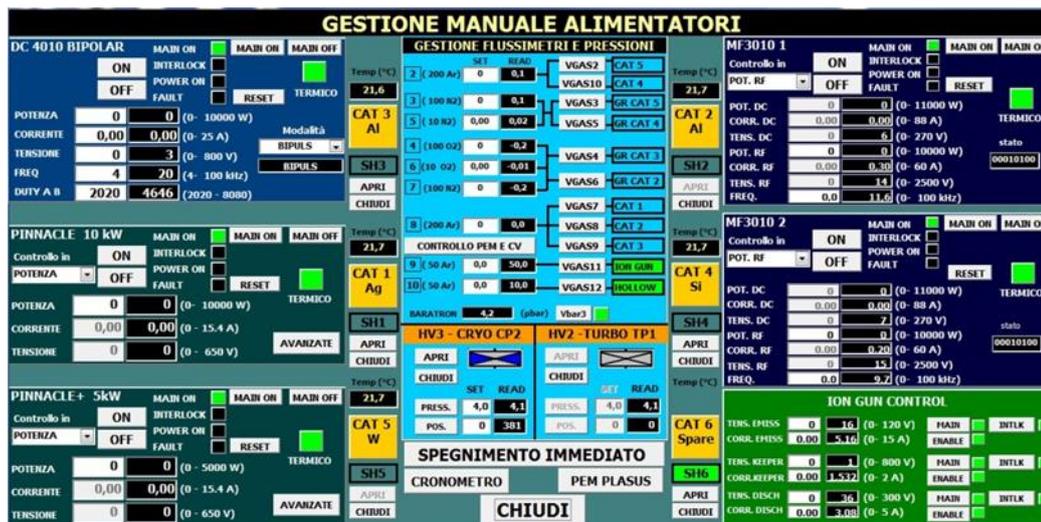


Figura 177. Software HMI: finestra per la gestione manuale della camera di processo

Il personale Kenosistec, con la stretta collaborazione e sotto la supervisione dei ricercatori ENEA, ha portato a termine la messa a punto dell'up-grade realizzato per l'implementazione della tecnica IBAD sull'impianto dell'ENEA.

Durante la fase di messa a punto finale il personale della ditta ha effettuato un training per il personale ENEA in modo da rendere efficace, sicuro ed ergonomico l'utilizzo dell'impianto di sputtering sia nelle normali fasi di gestione che in quelle di manutenzione ordinaria. Inoltre è stata consegnata la documentazione (disegni esecutivi, schemi elettrici e controllistici, schemi funzionali vari) e la manualistica (relativa all'up-grade hw e sw della macchina e della strumentazione, componenti e materiali commerciali) previste che risultavano complete. Al termine della fase di messa a punto sono stati condotti, con esito positivo, i test e le verifiche di collaudo finale dell'impianto. L'impianto con l'up-grade realizzato e funzionante risultava infine disponibile per la pianificata attività sperimentale di fabbricazione materiali con tecnica IBAD.

a.3 Simulazione ottica di strutture interferenziali a film sottili a partire da indici ottici di materiali bulk

Uno fra gli obiettivi finali della Linea Progettuale "Solare Termodinamico" è quello di migliorare i parametri foto-termici dei rivestimenti solari utilizzando la configurazione multistrato dielettrico-metallo in sostituzione della consolidata tecnologia a base di strati cermet. Fissati valori d'eccellenza per i parametri foto-termici [97 e 7% per l'assorbanza e l'emissività per coating di utilizzo a 400°C, 95 e 12% per coating di utilizzo a 580°C], è nata l'esigenza di verificare se da un punto di vista puramente teorico erano realizzabili rivestimenti multistrato in grado di soddisfare questi requisiti tecnici.

E' stata quindi condotta un'attività di progettazione ottica che ha avuto come primo obiettivo la simulazione di una serie di strutture multistrato dielettrico-metallo al fine di valutare i valori massimi teorici dei parametri foto-termici che si potevano ottenere con queste strutture e, come secondo obiettivo, lo studio della dipendenza delle prestazioni foto-termiche dalle proprietà ottiche dei materiali utilizzati per simulare il rivestimento stesso. Allo scopo, è stato utilizzato il software di progettazione ottica Macleod

La prima parte del lavoro di progettazione e simulazione ottica è stata condotta su due strutture multistrato ideate e brevettate dal National Renewable Energy Laboratory (NREL, Denver, USA). Una prima struttura era composta da strati metallici di TiSi alternati a strati ceramici di TiO₂ e SiO₂. La struttura era composta da 9 strati. In questo caso, ottimizzando la stratificazione, sono stati raggiunti valori di assorbanza solare pari al 97,3% e di emissività pari al 6,55% per un coating solare ottimizzato per essere impiegato a 400 °C, mentre per coating operanti a 580 °C sono stati ottenuti rispettivamente valori di 95,25 e 8,18%. Pertanto, almeno dal punto di vista puramente teorico, i requisiti tecnici stabiliti in fase progettuale sono stati soddisfatti per entrambe le tipologie di impiego.

Una seconda struttura era composta da strati metallici di Pt e TiSi alternati a strati ceramici di TiO₂ e SiO₂. La struttura era composta da 9 strati. In questo caso, ottimizzando la stratificazione, sono stati raggiunti valori di assorbanza solare pari al 97,0% e di emissività pari al 7,37% per un coating solare ottimizzato per essere impiegato a 400 °C, mentre per coating operanti a 580 °C sono stati ottenuti valori rispettivamente di 95,45 e 12,0%. Dall'analisi dei risultati si è compreso che per questo multistrato i parametri foto-termici sono peggiori in quanto

la presenza del platino tende ad innalzare l'emissività emisferica del rivestimento rispetto a quella dell'omologo rivestimento con il TiSi.

La seconda parte del lavoro di progettazione e simulazione ottica di strutture multistrato dielettrico-metallo ha riguardato stratificazioni a base di materiali (W, AlN, SiO₂) già impiegati con successo nell'ideazione, realizzazione e brevettazione di coating solari, con tecnologia cermet, per impiego ad alta temperatura.

Un primo rivestimento è stato ottimizzato per i 400 °C e come obiettivo dell'ottimizzazione si è mirato ad avere un rivestimento con un'assorbanza solare superiore al 97%. Il coating ottimizzato dava un valore di assorbanza solare pari a 97,2%. Tuttavia, l'emissività di questo rivestimento è risultata pari a 9,54%, un valore molto più alto rispetto a quello atteso da progetto. Il successivo tentativo di abbassare l'emissività (6,82%) ha tuttavia comportato un abbattimento dell'assorbanza (95,8%). Dall'analisi dei risultati, quello che emerge chiaramente è che lo strato metallico di W ha proprietà ottiche che mal si adattano a strutture multistrato ad alta efficienza foto-termica.

Per questo motivo, nella stratificazione simulata, si è sostituito il tungsteno con il TiSi per il primo strato metallico incontrato dalla radiazione e l'ottimizzazione della struttura risultante ha fornito assorbanza solare ed emissività pari rispettivamente al 97,0 e al 7,08%, rispettivamente, per la temperatura operativa di 400 °C. In questo caso i valori ottenuti rispettano le specifiche di progetto. Un lavoro del tutto simile è stato condotto per il coating operante a 580 °C ed anche in questo caso i parametri foto-termici (95,3 e 9,1%) rispondono perfettamente ai requisiti di progetto. Nella Figura 178 si riporta la curva di riflettanza di questo rivestimento.

In conclusione, questa attività di progettazione e simulazione ottica di strutture multistrato dielettrico-metallo ha dimostrato chiaramente la grande potenzialità di questa innovativa tipologia di coating solari.

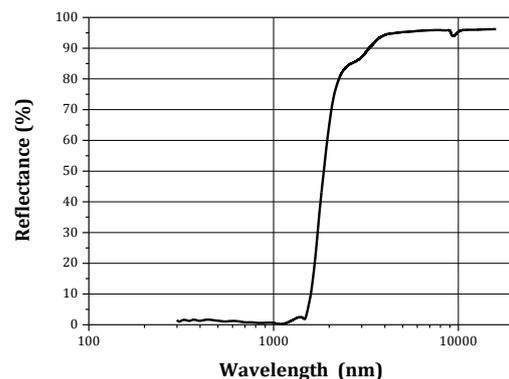


Figura 178. Riflettanza della struttura multistrato ENEA ottimizzata per i 580°C

a.4 Prove di fabbricazione di strati metallici molto sottili ottenuti mediante tecnica IBAD. Comparazione dei risultati con quelli ottenuti mediante tecnica standard sputtering e valutazione prospettica delle potenzialità della nuova tecnica

Per quanto concerne l'obiettivo di progettare e produrre coating solari a base di strati ceramici alternati a strati metallici, grande importanza sull'efficacia foto-termica assume la qualità ottica del film metallico, strato che risulterà otticamente tanto più efficace quanto più le sue proprietà si approssimeranno a quelle del materiale di bulk. Da oltre 10 anni, la tecnica principe utilizzata con successo in ENEA per la fabbricazione dei coating solari a base di strati cermet è la tecnica magnetron sputtering. Tuttavia, questa tecnica non è in grado di produrre strati sottili altamente compatti ed a bassa densità di difetti. Per lo strato sottile metallico questo fatto dà luogo a microporosità e difetti del grano cristallino che inficiano fortemente le proprietà metalliche dello strato stesso (bassa riflettanza spettrale e bassa conducibilità elettrica). Viceversa, la deposizione per sputtering assistita da cannone ionico (sputtering+IBAD) ha tutti i requisiti per produrre materiali più compatti e meno difettati. La caratterizzazione strutturale ed ottica degli strati prodotti e la correlazione tra le proprietà derivanti è un'attività di fondamentale importanza per il perseguimento dell'obiettivo del progetto. Di conseguenza, era essenziale partire dall'attività preliminare di fabbricazione di strati sottili metallici mediante la classica tecnica di sputtering magnetron, dalla caratterizzazione degli stessi strati e dalla comparazione tra i coefficienti ottici dei materiali così prodotti e quelli relativi agli stessi materiali in forma di cristalli bulk. Il completamento dell'implementazione della tecnica IBAD sul preesistente impianto di sputtering è avvenuto solo in prossimità della scadenza dell'annualità (settembre 2013) e questo non ha consentito l'ottimizzazione di campioni prodotti con tecnica sputtering+IBAD.

Strati sottili metallici di W e di Ag e di un materiale ceramico (SiO₂) d'interesse per il prosieguo del Progetto sono stati depositati utilizzando l'impianto multi-catodo di sputtering dell'ENEA ancora non "upgradato". Per quanto concerne i materiali metallici, i parametri di deposizione (vuoto base, pressione di processo, potenza di catodo, etc.) sono stati ottimizzati in entrambi i casi, al fine di produrre W prevalentemente in fase cristallina α ed Ag a struttura cubica con domini di grano cristallino sufficientemente grandi. Gli spessori dei film erano circa 100 nm. Per questi campioni sono state condotte sia misure spettrofotometriche (riflettanza spettrale nell'intervallo 200-2500 nm) sia misure ellissometriche (determinazione degli indici ottici n e k nel range 200-1700 nm). Successivamente, al fine di validare le misure ellissometriche, le riflettanze spettrali ottenute a partire dagli indici ottici ellissometrici sono state confrontate con le corrispondenti riflettanze spettrali spettrofotometriche.

Alla fine di questo percorso, è risultato fondamentale confrontare gli indici ottici sperimentali determinati sui campioni prodotti in forma di film sottili con i corrispettivi indici ottici degli stessi materiali metallici in forma di cristalli bulk. Come si era prospettato nelle considerazioni iniziali del progetto, dal confronto emergono discostamenti importanti. In particolare, per quanto riguarda il W il coefficiente di estinzione del film prodotto si mantiene notevolmente basso all'aumentare della lunghezza d'onda, in comparazione a quanto accade per il W in forma bulk. Questo fatto comporta una risalita della riflettanza poco ripida nel vicino infrarosso, con grave detrimento delle proprietà spettralmente selettive necessarie alla realizzazione di un efficace coating solare (Figura 179).

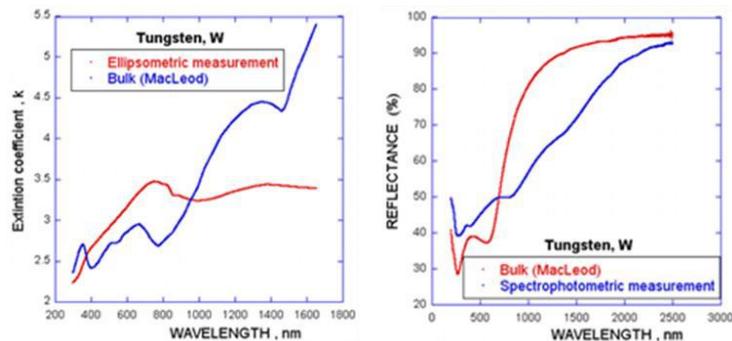


Figura 179 . Spettri del coefficiente di estinzione e della riflettanza per film di tungsteno sputterato e per cristallo bulk

Meno drammatica appare la situazione per l'Ag, laddove ad un coefficiente di estinzione praticamente sovrapponibile a quello del materiale bulk si abbina un indice di rifrazione sostanzialmente più basso rispetto al materiale di bulk per l'intero spettro di misura. Di conseguenza, i discostamenti delle rispettive riflettanze spettrali risultano meno marcati.

Per quanto concerne l'ossido di silicio (SiO_2), questo è stato ottimizzato e depositato utilizzando la tecnica dello sputtering reattivo: tramite tecnica di Plasma Emission Monitoring (PEM) quantità controllate di ossigeno vengono immesse in prossimità del target di silicio con l'obiettivo di mantenere le condizioni di superficie del target in regime di transizione con alta velocità di deposito e materiale depositato quanto più prossimo alla silice stechiometrica. A valle del lavoro di messa a punto dei parametri delle deposizioni effettuate sotto controllo PEM, campioni fabbricati con processo ottimizzato sono stati caratterizzati mediante opportune misure spettrofotometriche ed ellissometriche. L'indice di rifrazione e il coefficiente di estinzione misurati ellissometricamente sono stati utilizzati all'interno del software MacLeod per simulare il film depositato e ricavare le relative curve spettrali di riflettanza e di trasmittanza. L'evidenza che è scaturita è che non apprezzabile alcuno shift significativo tra le curve spettrofotometriche e quelle ellissometriche, confortandoci sulla bontà della tecnica ellissometrica per la valutazione degli indici ottici del nostro strato dielettrico di ossido di silicio.

I risultati ottenuti su W e Ag, prodotti con classica tecnica di sputtering magnetron, costituiranno il riferimento per il processo di ottimizzazione degli stessi materiali prodotti con tecnica sputtering+IBAD.

Delle azioni necessarie per il conseguimento dei risultati attesi, è stato possibile espletare, fondamentalmente, quelle preliminari di fabbricazione di strati sottili metallici mediante tecnica sputtering magnetron standard (adoperando l'impianto multi-catodo dell'ENEA non "upgradato") e caratterizzazione ottica (spettrofotometrica ed ellissometrica) degli stessi strati con studio ed analisi dei risultati ottenuti dalle misure.

Il raggiungimento dei risultati finali previsti per l'attività comporta necessariamente l'espletamento delle seguenti azioni:

- fabbricazione di strati metallici molto sottili con tecnica di deposizione magnetron sputtering assistita da fascio ionico (IBAD);
- caratterizzazione ottica degli strati depositati di cui al punto precedente;
- comparazione delle proprietà ottiche dei materiali fabbricati mediante le due tecniche di deposizione (standard sputtering e ion beam assisted sputtering) per una valutazione prospettica delle potenzialità della tecnica IBAD.

b. Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Le attività hanno riguardato lo studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di nuove configurazioni impiantistiche alternative a quelle attuali, per individuare quelle più promettenti sia dal punto di vista dell'efficienza e produttività che dei costi di realizzazione e di esercizio. Le soluzioni impiantistiche hanno messo a confronto l'utilizzo di fluidi termici diversi (olio, miscele binarie/ternarie di sali fusi o fluidi gassosi). Per lo

sviluppo di nuovi sistemi di accumulo termico sono stati studiati e caratterizzati nuovi fluidi che utilizzano miscele di materiali a cambiamento di fase PCM (Phase Change Materials), con aggiunta di nanoparticelle.

Le attività sono state condotte prevalentemente presso i laboratori ENEA della Casaccia; per lo studio e la caratterizzazione dei PCM e delle nanoparticelle è stato utilizzato il contributo dell'Università di Perugia e dell'Università di Roma La Sapienza.

b.1 Analisi tecnico-economica di impianti solari termodinamici a collettori parabolici lineari

La produzione di energia elettrica da solare a concentrazione rappresenta un'importante opportunità per l'industria italiana in vista dei grossi programmi di costruzione in diversi Paesi (Nord Africa, Medio Oriente, Cina, India ecc.) e tecnologie fortemente innovative, con prestazioni all'avanguardia, forniscono un vantaggio competitivo per concorrere alla realizzazione. Al fine di indirizzare l'industria italiana nello sviluppo di nuovi e più efficienti impianti e componenti per il solare a concentrazione, in questo lavoro si confrontano diverse configurazioni impiantistiche in modo da individuare le linee di sviluppo più promettenti dal punto di vista applicativo. Sono stati analizzati e confrontati tre diversi schemi impiantistici per un'applicazione di media taglia (50 MWe), basati sull'utilizzo di tre diversi fluidi per il trasferimento del calore e l'accumulo termico.

Il primo schema si basa su una miscela di sali fusi "binaria", formata da nitrato di sodio e nitrato di potassio; il secondo schema su una miscela "ternaria", costituita da nitrato di sodio, nitrato di potassio e nitrato di litio, per il trasporto del calore, e sulla miscela binaria per l'accumulo termico. Il terzo schema si basa sull'olio termico come fluido termovettore e la miscela di sali "binaria" per il solo accumulo termico.

Il primo schema (miscela binaria) rappresenta la soluzione di base sviluppata dall'ENEA e già utilizzata per l'impianto Archimede di Priolo; il terzo schema (olio termico + miscela binaria) riprende una soluzione adottata in alcuni impianti spagnoli, come Andasol. Il secondo schema (miscela ternaria) rappresenta invece una proposta innovativa, che punta a migliorare le prestazioni di impianto e ridurne i costi di esercizio. In particolare, poiché la miscela ternaria presenta una temperatura di congelamento sensibilmente inferiore rispetto alla miscela binaria, questa soluzione rende possibile mantenere l'impianto a temperatura più basse nelle ore notturne e ridurre le perdite di energia per dispersione del calore.

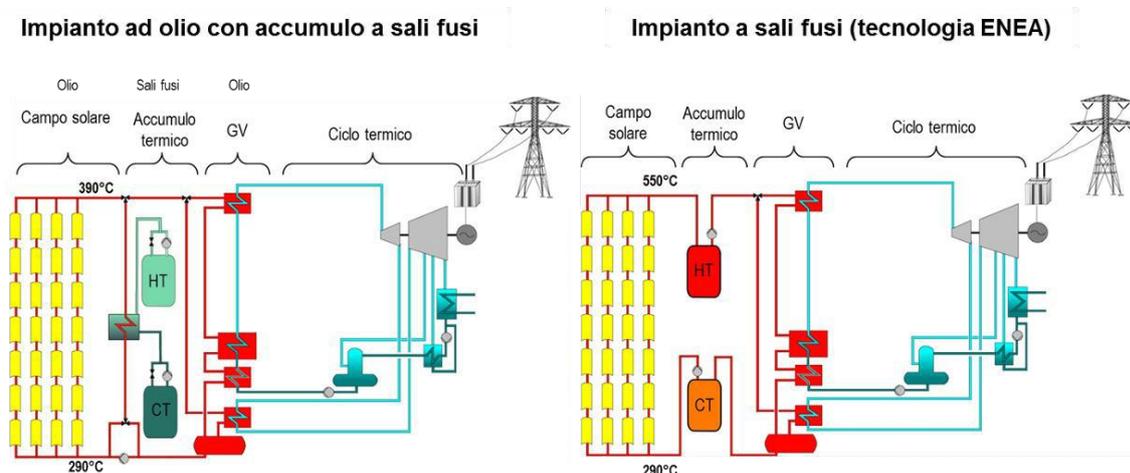


Figura 180. Confronto tra la configurazione degli attuali impianti ad olio con la tecnologia ENEA

In considerazione del notevole sviluppo lineare di un impianto della potenza assunta, dell'ordine delle decine di chilometri, il risparmio energetico conseguente può avere un impatto significativo sul bilancio energetico dell'impianto e va confrontato con la soluzione basata sull'olio termico, che consente temperature notturne ancora inferiori, ma presenta minore rendimento a causa dei limiti sulla temperatura massima di esercizio. Il secondo e il terzo schema utilizzano quindi due fluidi distinti per il trasporto del calore e per l'accumulo termico e richiedono quindi due circuiti distinti, con uno scambiatore di calore interposto. Nello schema olio termico + miscela binaria si può utilizzare uno scambiatore tradizionale a fascio tubiero, come in altri progetti (Andasol). Per lo schema sali ternari + sali binari, in conseguenza della novità e delle problematiche connesse con la maggiore viscosità, sono proposte diverse soluzioni impiantistiche, in termini di tipo dell'apparecchiatura e di dimensionamento.

La parte di generazione di energia elettrica (power block) viene simulata ed ottimizzata con il codice GateCycle.

La valutazione economica delle tre soluzioni, con l'analisi di sensibilità rispetto ai principali parametri, mette a confronto costo di impianto e costo unitario di produzione dell'energia elettrica nei tre casi, partendo dalla stessa potenza nominale (50 MWe) e dimensionando il campo solare per ogni caso, in funzione della potenza termica del generatore di vapore e dell'efficienza della stringa del campo solare.

Al fine di poter effettuare un primo dimensionamento del campo solare ed una valutazione dell'energia termica raccolta è necessario conoscere la curva di radiazione solare diretta DNI (Direct Normal Irradiation) relativa la sito ove dovrà essere installato l'impianto. Nel presente studio sono utilizzati a tale scopo i dati relativi alla radiazione di Priolo Gargallo (Sicilia), che presenta un valore di 1936 kWh/m²/a. In Figura 181 è rappresentata la radiazione diretta media mensile riassunta anche nella Tabella 38, mentre nella Figura 182 viene rappresentata la curva oraria della radiazione diretta DNI.

Tabella 38. DNI media mensile

Mese	DNI [Wh/m ²]
Gennaio	120,3
Febbraio	106,9
Marzo	158,5
Aprile	146,0
Maggio	217,4
Giugno	241,7
Luglio	255,8
Agosto	232,3
Settembre	159,4
Ottobre	155,3
Novembre	91,9
Dicembre	50,6

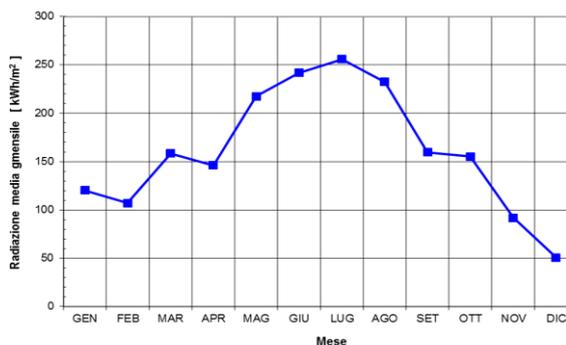


Figura 181. Media mensile della radiazione solare diretta

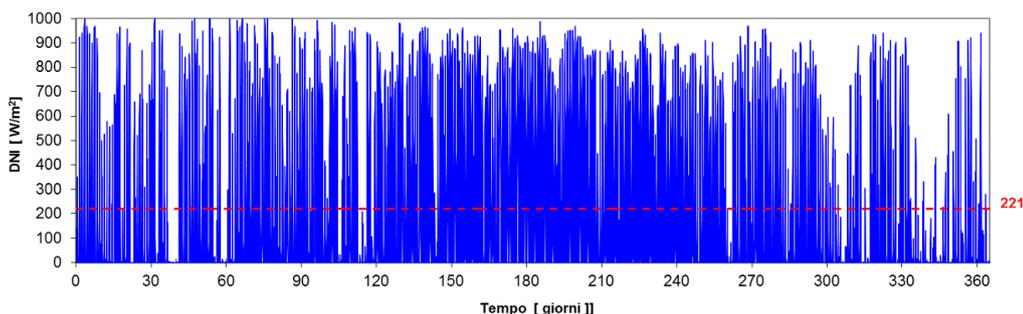


Figura 182. Radiazione solare diretta

Per valutare l'effettiva energia termica raccolta dal campo solare è necessario determinare la radiazione diretta sul piano dei collettori (radiazione efficace) che dipende dall'orientamento dei collettori (tipicamente N-S) dalla tipologia di inseguimento (un solo asse E-O) e dall'effetto di ombreggiamento tra le file dei collettori. Nel caso in esame, la distanza tra le file di collettori solari è stata fissata pari a 15 m, corrispondente a 2,5 volte l'apertura del collettore, in modo tale da ottimizzare le dimensioni dell'impianto, riducendo l'effetto ombra e permettendo un più agevole passaggio per le operazioni di manutenzione, si ottiene quindi la curva oraria della radiazione efficace, ANI (Aperture Normal Irradiance), riportata in Figura 183, che presenta un integrale annuo di 1556 kWh/(m² a) e valore medio di circa 178 W/m². In Figura 184 è riportato il confronto tra le curve medie mensili della radiazione diretta ed efficace.

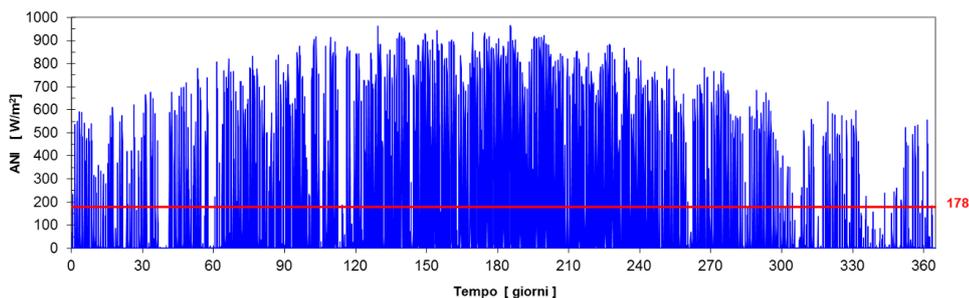


Figura 183. Radiazione solare efficace

Una volta valutata quindi la curva di radiazione efficace che va ad incidere sugli specchi è possibile passare ad un dimensionamento del campo solare. I dati di input dai quali si è partiti sono la potenza elettrica richiesta 50 MWe e capacità di accumulo, 7,5 ore di funzionamento a pieno carico in assenza di radiazione solare. Per valutare la superficie totale riflettente richiesta al fine di soddisfare l'utenza si esegue un bilancio energetico:

$$\overline{P_{GV}} = \bar{I} * \eta * S$$

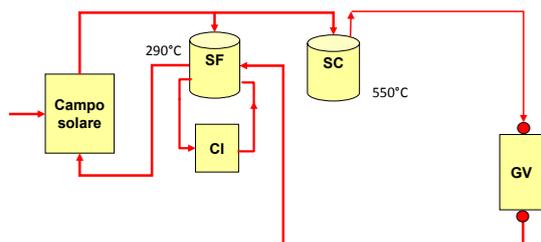
\bar{I} è la radiazione incidente media, η il rendimento medio di captazione e S la superficie del campo solare. La radiazione incidente media generalmente è definita come il valore della radiazione mediato su tutto l'anno ed è ovviamente funzione del sito.

Conoscendo la superficie del singolo collettore ed il numero di collettori per stringa si arriva a determinare il numero di collettori presenti nel campo solare. Fatto ciò si passa alla valutazione della quantità di fluido necessaria per il sistema di accumulo termico; conoscendo il numero di ore di accumulo, è possibile valutare l'energia media da accumulare come:

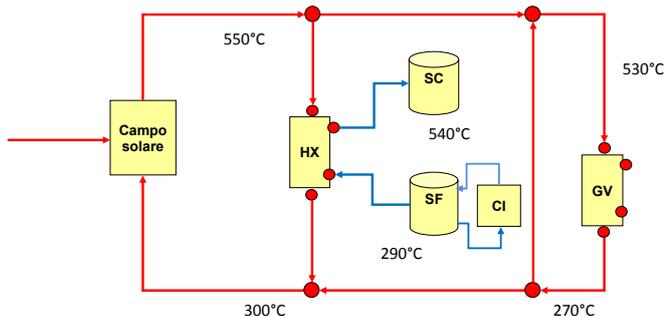
$$E_{acc} = P_{GV} * ore_{acc}$$

Conoscendo le due temperature massima e minima dell'accumulo si può valutare la massa del fluido contenuto nei serbatoi e quindi si possono dimensionare questi ultimi.

a) CAMPO SOLARE E SISTEMA DI ACCUMULO A SALI BINARI



b) CAMPO SOLARE A SALI TERNARI E SISTEMA DI ACCUMULO A SALI BINARI



c) CAMPO SOLARE A OLIO DIATERMICO E SISTEMA DI ACCUMULO A SALI BINARI

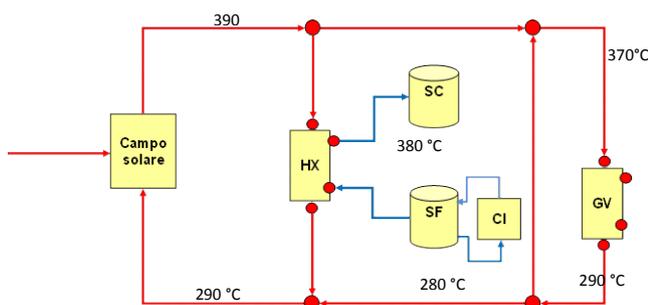


Figura 185. Configurazione dei tre impianti in studio

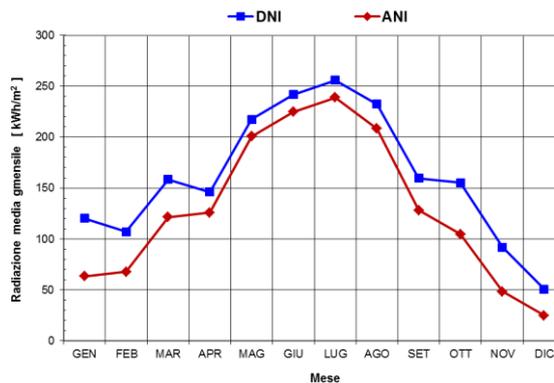


Figura 184. Confronto della radiazione media mensile

In Figura 185 sono riportati gli schemi dei tre tipi di impianto oggetto del presente studio. Il primo schema (Figura 185a) è quello in cui vengono utilizzati i sali binari sia nel campo solare che nel sistema di accumulo, il secondo (Figura 185 b) prevede sali ternari come fluido termovettore all'interno del campo solare e sali binari per il sistema di accumulo e l'ultimo schema (Figura 185c) è quello relativo al campo solare che utilizza olio diatermico come fluido termovettore e il sistema di accumulo a sali binari.

Nelle tipologie nelle quali, come fluido termovettore, si utilizza olio o sali fusi ternari è di fondamentale importanza lo studio dello scambiatore di calore che unisce il circuito a olio con quello a sali. Questo scambiatore, infatti, deve essere in grado di scambiare, nella maniera più efficiente possibile, il calore acquisito dal campo solare mediante l'olio o il sale ternario, con quello del sistema di accumulo che invece si serve di sali fusi binari.

Nell'impianto olio/sali binari, in condizioni di irraggiamento superiori alla richiesta termica del generatore di vapore, lo scambiatore dovrà essere in grado di raffreddare l'olio proveniente dal campo solare da 390 a 290 °C e riscaldare il sale proveniente dal serbatoio freddo da 280 a 380 °C. Al contrario, in condizioni di irraggiamento inferiori alla richiesta termica necessaria alla produzione elettrica voluta, lo scambiatore dovrà riscaldare l'olio fino a 370 °C a spese del sale che dal serbatoio caldo da 380 °C, si porterà

a 280 °C andando in quello freddo.

Nell'impianto sali ternari/sali binari, in condizioni di irraggiamento superiori alla richiesta termica del generatore di vapore, lo scambiatore dovrà essere in grado di raffreddare il sale ternario proveniente dal campo solare da 550 a 300 °C e riscaldare il sale proveniente dal serbatoio freddo da 290 a 540 °C. Al contrario, in condizioni di irraggiamento inferiori alla richiesta termica necessaria alla produzione elettrica voluta, lo scambiatore dovrà riscaldare il sale ternario fino a 530 °C a spese del sale che dal serbatoio caldo da 540 °C si porterà a 290 °C e andrà nel serbatoio freddo.

Naturalmente, siccome l'irraggiamento non è costante, durante la giornata, la portata del fluido termovettore entrante nello scambiatore sarà variabile.

Lo scambiatore, tuttavia, dovrà essere dimensionato per le condizioni nominali. Al fine di elaborare una valutazione tecnico-economica quanto più accurata possibile, data la peculiarità di questa apparecchiatura rispetto agli impianti in essere, si è pensato di calcolarne un dimensionamento di massima. Questa esigenza è stata voluta per non introdurre variabili troppo incerte nell'analisi economica.

Inizialmente, come tipologia di scambiatore si è scelta quella più classica per questo tipo di impianti e cioè quella a fascio tubiero. Si è visto che, per l'impianto ad olio/sali binari, tale tipologia può essere accettabile anche se la superficie di scambio, e conseguentemente il prezzo, appaiono elevati per l'impianto in questione. Per la tipologia sali ternari/sali binari, invece questo tipo di scambiatore è inaccettabile. Il dimensionamento, naturalmente, è stato eseguito con le stesse modalità viste per lo scambiatore a fascio tubiero, tuttavia i risultati ottenuti hanno mostrato che tale tipologia non si presta affatto alle caratteristiche di questi sali. La superficie di scambio necessaria calcolata, infatti è molto superiore a quella dello scambiatore olio/sali binari. Il motivo di tale inconveniente risiede nel coefficiente di scambio globale molto più basso.

Questo è dovuto principalmente alle "peggiori" caratteristiche reologiche del sale ternario rispetto all'olio. Come si vede dalla Tabella 39, la conducibilità termica risulta 6 volte superiore per il sale e il calore specifico del 60% inferiore e questo fa abbassare il numero di Prandtl (Pr) e quindi il coefficiente di scambio interno, ma è soprattutto la viscosità a sfavorire lo scambio termico, infatti quella del sale è ben 5 volte superiore e questo incide negativamente e proporzionalmente sul numero di Reynolds (Re) che si abbassa drasticamente determinando una minore turbolenza e quindi un forte abbassamento del coefficiente di scambio interno

Tabella 39. Confronto delle caratteristiche del sale ternario e dell'olio

		Sale ternario	Olio
Conducibilità termica, W/(m K)	k	0,52	0,084
Calore specifica, J/kg K	cp	1514,4	2446,2
Viscosità, Pa s	μ	0,00166	0,00020
Densità, kg/m ³	ρ	1826,1	767,4

Per superare quest'ultimo inconveniente, che è il più gravoso, occorrerebbe quindi diminuire la sezione di tubi, ma questo, oltre che un aumento di costi determinerebbe un forte incremento delle perdite di carico che sono proporzionali al quadrato della velocità.

E' stato dunque dimensionato uno scambiatore a piastre. Questo tipo di scambiatori, seppure più costosi, presentano il vantaggio di minori perdite di carico con possibilità di aumentare notevolmente la velocità. Essi possono lavorare anche con differenze di temperatura dell'ordine di 1 °C, contrariamente a quelli a fascio tubiero che difficilmente possono arrivare sotto i 5 °C.

La maggiore turbolenza che in essi si realizza consente di avere elevati coefficienti di scambio anche con piccole perdite di carico. Di contro, i tipi più commerciali e quindi più economici non possono superare i 250 °C, quindi per i nostri scopi occorrono scambiatori di acciaio legato con guarnizioni speciali o a piatti saldati, che rendono l'apparecchiatura più dispendiosa. Dai calcoli effettuati, tuttavia, l'utilizzo di questo scambiatore per il disaccoppiamento sali ternari/sali binari è molto più conveniente anche a livello economico, per la minore superficie di scambio necessaria. E' stato quindi dimensionato questo tipo di scambiatore anche per l'impianto olio/sali binari e si è visto che, anche in questo caso, risulta conveniente per un fattore superiore a 3.

Per quanto riguarda il costo di produzione di energia elettrica al kWh, è stato considerato l'investimento iniziale, l'esercizio e manutenzione nonché il combustibile di integrazione e le esternalità dovute alle emissioni di anidride carbonica, anidride solforosa e ossidi di azoto.

In pratica i passaggi seguiti sono stati:

- calcolo dell'investimento iniziale che tiene conto in particolare del:
 - terreno;
 - campo solare;
 - accumulo termico (comprensivo dello scambiatore di disaccoppiamento);
 - gruppo per la generazione di energia elettrica;
 - forno per l'integrazione energetica;
 - lavori civili.
- calcolo del costo annuale di ammortamento, determinato dividendo il costo dell'investimento iniziale per il fattore di annualità (Fa) definito come:

$$Fa = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j}$$

in cui n indica gli anni di vita utile e i è il tasso di sconto effettivo;

- calcolo del costo annuo di gestione, comprendente l'esercizio e manutenzione e il costo del combustibile;
- calcolo del costo specifico di produzione di energia elettrica ottenuto dividendo il costo annuale per la produzione di energia elettrica.

Tutti i costi sono stati valutati sulla base di valori di mercato e, ove non disponibili, da dati di letteratura o da manuali specializzati.

Il prezzo più conveniente si ottiene nella configurazione a sali binari ove, pur avendosi le maggiori perdite per dispersione in assenza di radiazione e il maggior costo, per unità di superficie, del campo solare non si ha lo scambiatore di disaccoppiamento e si ha il più basso costo per il fluido termovettore. Nel sistema ad olio il costo dell'accumulo è proporzionalmente elevato rispetto al costo di investimento dell'impianto (Figura 186) e questo incide notevolmente sul costo energetico finale.

Questo aspetto è dovuto principalmente al minor salto termico del sistema di accumulo, che in questo caso è di 100 °C contro i 260 °C delle configurazioni nelle quali si utilizza il sale come fluido termovettore. La minore temperatura massima contribuisce anche ad un minor rendimento del sistema di generazione elettrica (37% contro il quasi 41% del caso di impianti a sali).

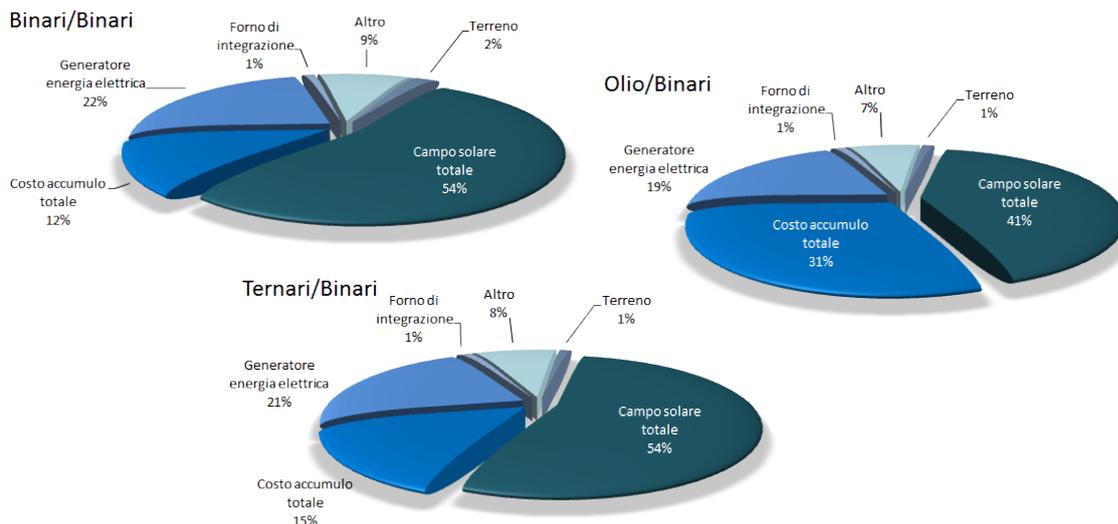


Figura 186. Ripartizione dei costi tra le diverse soluzioni

Da questa analisi si può comprendere, quindi, come impianti che utilizzino olio come fluido termovettore siano convenienti solo senza o con piccoli accumuli termici, mentre aumentando la quota di accumulo termico gli impianti a sali si dimostrano migliori dal punto di vista economico.

La tabella 40 riassume il costo energetico di produzione, il costo totale d'investimento e la produzione di energia elettrica annuale relativamente ad un impianto da 50 MWe nelle tre configurazioni considerate:

Tabella 40. Costo totale d'investimento e la produzione di energia elettrica di un impianto da 50 MW nelle tre configurazioni considerate

	sali binari	olio/sali	sali binari/ternari
Produzione energia elettrica, MWh/a	144 607	153 819	150 558
Superficie di captazione, m ²	423 168	457 690	432 077
Costo investimento, k€	234 712	279 023	253 961
Costo energia elettrica, €/MWh	222	245	226

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/077.

b.2 Valutazione dell'utilizzo di fluidi gassosi in impianti solari termodinamici

L'attività di ricerca ha avuto l'obiettivo di studiare la possibilità dell'utilizzo di un fluido gassoso come fluido termovettore all'interno dei tubi ricevitori di un impianto termodinamico a collettori parabolici lineari e di definire la configurazione del ciclo termodinamico per la produzione di energia elettrica.

Lo sviluppo delle attività ha permesso di raggiungere i seguenti obiettivi:

- definizione del layout del modulo del campo solare;
- definizione del fluido gassoso ottimale per un impianto di potenza;
- definizione delle caratteristiche del ciclo termodinamico che permette di raggiungere un rendimento totale competitivo con gli impianti di produzione convenzionali.

La configurazione del modulo del campo solare è stata definita analizzando l'efficienza di raccolta della radiazione solare in funzione della pressione di esercizio del fluido termovettore, sono state analizzate due possibili disposizioni dei collettori: collegamento in serie o in parallelo di due linee costituite da due collettori solari di lunghezza 50 m (Figura 187).

I risultati di questa analisi sono i seguenti:

- per il collegamento in parallelo l'aumento di pressione nel fluido termovettore non comporta un incremento sostanziale dell'efficienza di raccolta di energia termica;
- per pressioni inferiori a circa 60 bar l'efficienza di raccolta di calore del collegamento in parallelo è maggiore rispetto al collegamento in serie, ma a pressione superiore il risultato è opposto.

Per impianti ad alta pressione la connessione dei collettori solari in serie sarebbe la soluzione migliore perché terrebbe conto anche di esigenze diverse:

- limitare la temperatura massima del tubo d'acciaio a circa 580 °C, per ridurre il degrado nel tempo delle caratteristiche fototermiche del coating del tubo ricevitore (cermet);
- ridurre la differenza di temperatura tra le zone irraggiata e non irraggiata dei tubi d'acciaio;
- aumentare la continuità di funzionamento dell'impianto solare. Con il collegamento in serie è possibile mantenere la temperatura del fluido al valore di progetto di 550 °C anche in condizioni di perdita di vuoto del tubo ricevitore (nell'intercapedine tra tubo di vetro e di acciaio), di un elevato numero di tubi ricevitori.

Per queste motivazioni si è definita come configurazione di riferimento del modulo quella costituita da 4 collettori parabolici di lunghezza 50 m collegati in serie. Il collegamento in serie di due collettori da 100 m sarebbe la soluzione più semplice, più efficiente e meno costosa, ma è ancora oggetto di studio.

Per definire il fluido ottimale per impianti di potenza, sono stati presi in considerazione quattro fluidi gassosi di riferimento: CO₂, N₂, aria, He. Per valutare l'efficienza di questi gas ad assorbire calore solare ad alta temperatura, sono state fatte delle simulazioni di esercizio del modulo di riferimento, assumendo una radiazione solare efficace di 900 W/m².

I risultati di queste simulazioni hanno dato un contributo significativo per definire il fluido termovettore ottimale per un impianto di produzione di energia elettrica. L'analisi di questi dati è riassunta nei punti seguenti:

- Per tutti i gas l'aumento della pressione non ha effetti sulla potenza termica assorbita dal fluido e quindi sull'efficienza di raccolta del calore, ma ha un notevole impatto sulla potenza di pompaggio e quindi

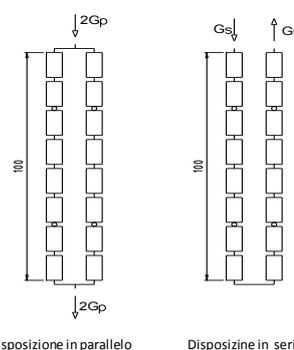


Figura 187. Possibili configurazioni dei collettori nel campo solare

aumenta la potenza termica assorbita al netto della potenza di pompaggio ideale (isoentropica). Per la CO₂, l'aumento della pressione da 30 a 100 bar comporta un incremento della potenza termica netta assorbita di circa 10,5 kW. Per l'aria tale incremento sarebbe 22,9 kW, per l'azoto 22,6 kW, per l'elio circa 12 kW. Ciò è dovuto alla riduzione delle perdite di carico per effetto della riduzione della velocità, causata dall'aumento della densità del gas. Per la CO₂, l'aumento della pressione di esercizio da 30 a 100 bar, porterebbe ad una riduzione della potenza di pompaggio da 10,11 a 0,89 kW, per l'aria da 24,34 a 2,16 kW, per l'elio da 12,93 a 1,17 kW.

- La Figura 188 mostra le curve della potenza netta assorbita dai diversi fluidi gassosi, in funzione della pressione nella sezione d'ingresso alla linea di tubi ricevitori. La Figura 189 mostra le curve della potenza di pompaggio ideale (isoentropica), e la Figura 190 le curve della perdita di pressione.

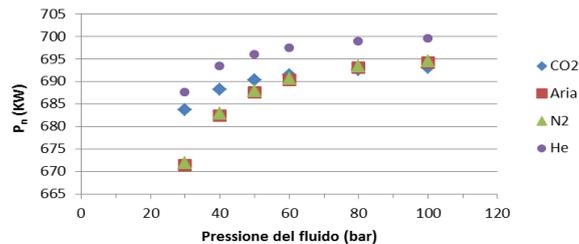


Figura 188. Potenza termica netta assorbita

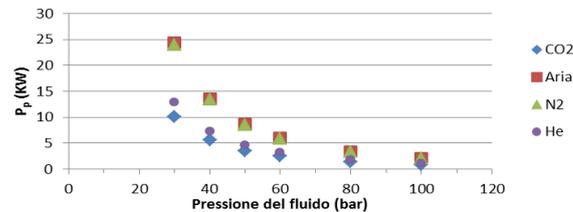


Figura 189. Potenza di pompaggio ideale (isoentropica)

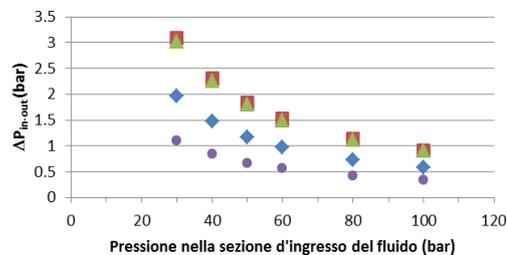


Figura 190. Perdita di pressione tra le sezioni di ingresso e uscita della linea di tubi ricevitori

- Escludendo l'elio, i numeri di Reynolds (Re), sono alti e abbastanza simili per tutti i gas, ciò significa che il regime di flusso è completamente turbolento (condizioni ottimali di scambio termico). Per l'elio i valori di Re sono nettamente inferiori e variano poco con la pressione. Nonostante ciò questo gas ha le migliori caratteristiche di raccolta della radiazione solare concentrata, perché è maggiore la potenza termica assorbita dal fluido, minore la temperatura media del tubo d'acciaio e quindi minore la perdita di calore per irraggiamento verso l'ambiente. L'elio è l'unico tra i fluidi di riferimento che permetterebbe di avere una temperatura media del coating nella zona irraggiata inferiore al valore limite stabilito per garantire nel tempo la stabilità termomeccanica del coating (580 °C). Per gli altri gas questo limite è superato al centro della zona irraggiata dell'ultimo tubo ricevitore, con una temperatura massima di circa 588 °C, per cui non è ritenuta una condizione particolarmente critica.
- Ad esclusione dell'elio, la portata in massa è praticamente la stessa (circa 1,5 kg s⁻¹) ed è abbastanza indipendente dalla pressione di esercizio. Per l'elio la portata è nettamente inferiore (circa 0,31 kg s⁻¹), per effetto della bassa densità, che a parità di pressione, comporta una maggiore velocità di flusso rispetto agli altri gas, di cui è necessario tenere conto (le vibrazioni flessionali del tubo d'acciaio sono legate a piccole variazioni di pressione impulsive generate dalla turbolenza). La Figura 191 mostra le curve della velocità di uscita del gas dall'ultimo tubo della linea di ricevitori. Considerando la potenza termica assorbita dal gas e la potenza di pompaggio ideale ceduta al fluido (compressione isoentropica, lavoro ceduto al fluido pari al

prodotto della perdita di carico in J/kg, per la portata in kg/s), l'aria e l'azoto sono praticamente equivalenti, cioè la potenza termica netta assorbita dai due fluidi è praticamente la stessa.

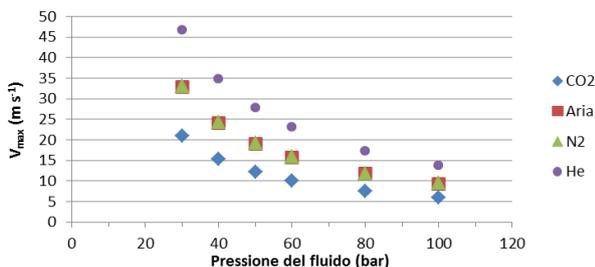


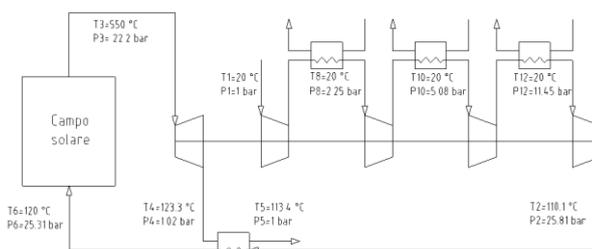
Figura 191. Velocità di uscita del fluido dalla linea di tubi ricevitori

- La potenza termica netta assorbita dall'aria a 30 bar è inferiore di circa 12 kW rispetto a quella assorbita dalla CO₂, ma a pressioni maggiori di circa 60 bar; i due fluidi sono praticamente equivalenti (a 100 bar la potenza termica netta assorbita dall'aria è maggiore di circa 1 kW rispetto alla CO₂).

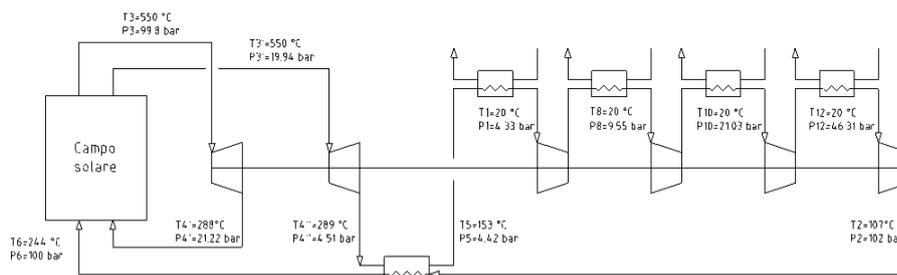
Per definire il fluido ottimale di un impianto a collettori parabolici lineari, oltre agli aspetti tecnici è necessario tenere conto anche dei costi di fornitura del fluido e dei costi e disponibilità sul mercato dei principali componenti: turbina e compressore. Mentre l'aria è a costo zero e la turbina e il compressore per questo fluido sono commercialmente disponibili, gli altri gas hanno un costo non trascurabile e probabilmente richiederebbero una fase iniziale di sviluppo, o comunque di adattamento e di ottimizzazione del funzionamento della turbina e del compressore. A questi costi si aggiungerebbero i costi di caricamento del fluido sull'impianto e soprattutto i costi di reintegro delle perdite di gas dovute alle eventuali perdite, che potrebbero non essere trascurabili, soprattutto con l'elio. L'uso dell'aria escluderebbe completamente questi costi e permetterebbe di sviluppare una filiera di impianti solari perfettamente ecocompatibili e a costi di esercizio contenuti.

Per definire le caratteristiche di un impianto solare termodinamico di potenza, con collettori lineari parabolici a fluido gassoso, son state analizzate tre diverse soluzioni impiantistiche:

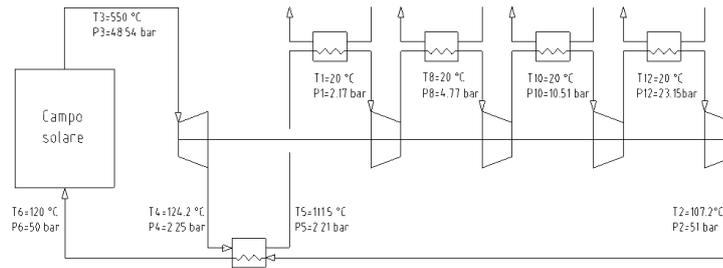
- Ciclo aperto con rigenerazione e inter-refrigerazione (pressione dell'aria nei tubi assorbitori 25 bar), Figura 192a;
- Ciclo chiuso con rigenerazione e inter-refrigerazione (pressione dell'aria nei tubi assorbitori 50 bar), Figura 192b;
- Ciclo chiuso con rigenerazione, inter-refrigerazione ed espansione frazionata in turbina con riscaldamento ripetuto (massima pressione dell'aria nei tubi assorbitori 100 bar), Figura 192c.



a) Ciclo aperto con rigenerazione e inter-refrigerazione



b) Ciclo chiuso con rigenerazione e inter-refrigerazione



c) Ciclo chiuso con rigenerazione, inter-refrigerazione ed espansione frazionata con riscaldamento ripetuto

Figura 192. Tipologie di cicli termodinamici a gas

I primi due cicli termodinamici hanno basso rendimento (18,6% il ciclo aperto e 20,7% il ciclo chiuso), il ciclo con espansione frazionata e riscaldamento ripetuto, ha un rendimento migliore (circa 30%), ma non è competitivo rispetto a un impianto solare a sali fusi (40%). Rendimenti più elevati si potrebbero ottenere aumentando la temperatura d'ingresso dell'aria in turbina. Per questa applicazione sarebbe quindi necessario sviluppare un nuovo tubo ricevitore, con una temperatura massima di esercizio superiore agli attuali 580 °C.

Una soluzione possibile con l'attuale tecnologia, potrebbe essere quella di realizzare un impianto ibrido con una caldaia a gas, tenendo conto che la caldaia dovrebbe essere integrata comunque nell'impianto solare, per mantenere costante la velocità di rotazione della turbina (rendendola indipendente dalla variabilità della radiazione solare).

La caldaia fornirebbe all'aria la quantità di calore necessaria per arrivare a circa 750 °C, ciò comporterebbe un rendimento totale d'impianto superiore al 40%, maggiore continuità di funzionamento ed elevato fattore di utilizzazione, perché l'impianto continuerebbe a produrre anche nel periodo invernale in cui la radiazione solare è scarsa.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/078.

b.3 Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico

Lo sviluppo degli impianti solari termodinamici impone tra i principali obiettivi la riduzione dei costi affinché questi impianti diventino sempre più competitivi con quelli tradizionali a combustibili fossili. In questi impianti, per sopperire alla naturale variabilità della fonte primaria di energia (radiazione solare), è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico che rappresenta quindi uno degli elementi base per ottenere una riduzione del costo dell'energia prodotta. Una soluzione alternativa all'accumulo a calore sensibile, sino ad oggi il più utilizzato, con ottime prospettive di riduzione dei costi, è quella basata sullo sfruttamento del calore latente (materiali a cambiamento di fase, PCM). Questo tipo di soluzione, che utilizza materiali a basso costo ed alta densità di energia, è però condizionata dalla loro ridotta capacità di trasporto del calore (diffusività termica). Oggetto della presente attività è lo sviluppo e la caratterizzazione di nuovi mezzi di accumulo termico (TES, Thermal Energy Storage), per temperature comprese tra i 120 ed i 600°C, che utilizzano una miscela di materiali a cambiamento di fase con aggiunta di nano particelle. Tali mezzi, detti nanoPCM, costituiranno l'elemento cardine per lo sviluppo di sistemi alternativi di accumulo termico che siano più compatti e potenzialmente di basso costo di quelli attualmente in uso. Le attività hanno previsto la realizzazione e la caratterizzazione di nuovi materiali a cambiamento di fase nano-caricati attraverso la selezione e caratterizzazione dei PCM di base e delle nanoparticelle da aggiungere agli stessi, nonché lo studio e sviluppo di metodi di miscelamento PCM-nanoparticelle in grado di assicurare la distribuzione ottimale dei singoli componenti.

I PCM e più in generale i sistemi di accumulo termico si possono classificare secondo ben definiti intervalli di temperatura, cui corrispondono altrettante ben definite applicazioni. Una classificazione di riferimento che sarà utile nel proseguimento di questo studio è la seguente:

- Bassa temperatura: < 120°C. Questo è il campo in genere riservato al solare termico senza concentrazione o con bassa concentrazione (pannelli piani).
- Medio-bassa temperatura: 120-200°C. Questo intervallo di temperatura è spesso caratteristico di applicazioni per fornitura di calore di processo, generazione di potenza con cicli organici (ORC), climatizzazione ad alta efficienza, desalinizzazione. A queste temperature è possibile utilizzare come fluido termovettore anche acqua a bassa pressione.

- Media temperatura: 200-300°C. Anche in questo caso si possono avere applicazioni in multi-generazione ma, chiaramente, i livelli di temperatura impongono l'utilizzo di oli diatermici e, nel contempo, permettono di avere generazione di potenza a rendimenti abbastanza elevati.
- Medio-alta temperatura: 300-400°C. E' l'intervallo tipico della generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari ad olio diatermico sino ad oggi realizzati. Le efficienze di conversione termo-elettrica sono elevate.
- Alta temperatura 400-600°C. In questo intervallo si ha ancora generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari od a torre ma non può essere più utilizzato l'olio diatermico. In genere, il fluido termovettore sarà un sale fuso. In questo caso le efficienze di conversione termo-elettrica sono molto elevate.
- Altissima temperatura: > 600°C. Oltre questa temperatura si parla di applicazioni a energia solare molto concentrata tipo dischi parabolici o torri solari. Il fluido termovettore spesso è aria/gas. L'uso di PCM, in questo caso, è ancora possibile ma in condizioni limite.

Chiaramente, il riferimento preferenziale sarà quello compreso tra i 120 ed i 600 °C, intervallo nel quale risiedono le applicazioni di maggiore interesse commerciale. I PCM candidati dovranno essere caratterizzati soprattutto dalla loro stabilità chimica con alcuni materiali di contenimento, dalle temperature di cambiamento di fase, dal calore latente e dalla diffusività termica.

Sulla base di quanto sopra riportato si è deciso di approfondire l'analisi delle caratteristiche termofisiche e chimiche di quattro PCM, uno per ciascun intervallo di temperatura di riferimento:

- | | |
|-----------------------------------|---|
| ▪ Temperatura medio-bassa (120°C) | LiNO ₃ , NaNO ₃ , KNO ₃ (37,5-18-44,5 mol%) |
| ▪ Temperatura media (222°C) | NaNO ₃ KNO ₃ (54-46 wt%) |
| ▪ Temperatura medio alta (337°C) | NO ₃ |
| ▪ Temperatura alta (498°C) | Na ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ (50-50 mol%). |

La possibilità, evidenziata dalla letteratura più recente, di incrementare le caratteristiche termofisiche (capacità termica specifica e conducibilità o diffusività termica), di questi PCM attraverso la dispersione di piccole quantità (1-2% v), di particelle di dimensioni nanometriche, ha condotto alla sintesi e caratterizzazione di nuovi mezzi di accumulo denominati nanoPCM. A tal fine, tra le numerose nanoparticelle disponibili, si sono selezionate quelle maggiormente riportate in letteratura e che, per le loro caratteristiche, potevano garantire maggiori possibilità di successo.

Le nanoparticelle utilizzate nello studio sono le seguenti:

- SiO₂, 100% silice, dimensione media 7 nm;
- Al₂O₃, 100% allumina, dimensione media 13 nm;
- TiO₂, 100% titania, dimensione media 20 nm;
- SiO₂-Al₂O₃, 82-86% silice e 14-18% allumina, dimensione media 2-200 nm.

L'indagine è stata condotta da ENEA, per quanto riguarda i PCM a temperature medio-bassa e alta, e dall'Università di Perugia, per quanto riguarda i PCM a temperature media e medio-alta. Nell'ambito delle attività descritte sono stati analizzati dal Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "Sapienza" i dati forniti dall'ENEA in merito alla determinazione della conducibilità termica tramite una apparecchiatura che fa uso del principio del filo riscaldato (hot-wire method).

Per un'analisi dettagliata del contributo ENEA e dell'Università di Perugia si può fare riferimento rispettivamente ai rapporti RdS/2013/079 e RdS/2013/081. Il contributo dell'Università di Roma è riportato invece nel rapporto RdS/2013/082

Sviluppo e caratterizzazione dei nanoPCM a media e medio-alta temperatura

Analisi morfologica delle nanoparticelle

La morfologia delle nanoparticelle selezionate è stata valutata tramite microscopia a scansione elettronica (Figura 193).

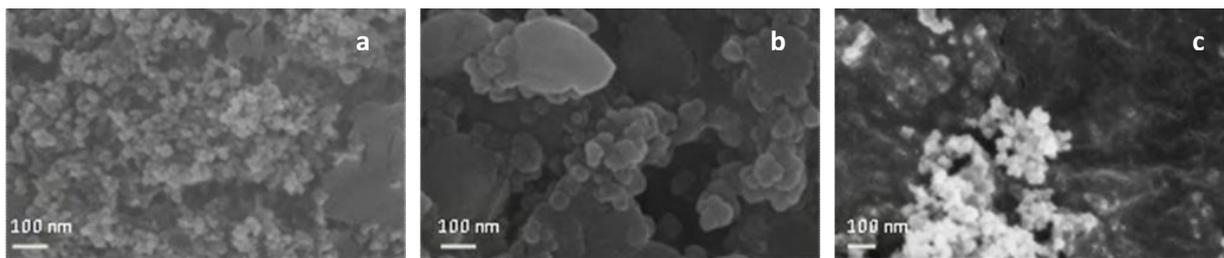


Figura 193. Immagini SEM delle nanoparticelle: a) Al_2O_3 b) SiO_2 c) $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$

Prove preliminari di corrosione

Al fine di verificare l'eventuale aggressività chimica verso i materiali presenti negli strumenti di misura, alcuni dei PCM base sono stati sottoposti a prove di corrosione immergendo per 24 ore in $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ a $300\text{ }^\circ\text{C}$ e in KNO_3 a $400\text{ }^\circ\text{C}$ dei campioni di alluminio, acciaio al carbonio e acciaio inossidabile AISI 316 di forma circolare (diametro 25 mm, spessore 3 mm e foro centrale di diametro 3 mm). I provini sono stati pesati prima e dopo i test e le superfici analizzate al microscopio ottico. Sia nel caso del $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ che nel caso di immersione in KNO_3 il materiale che è risultato più soggetto a corrosione è stato l'acciaio al carbonio. Nessuna evidenza di corrosione invece per l'acciaio AISI 316 e per l'alluminio. In Figura 193 si riportano le immagini dei provini soggetti a corrosione.

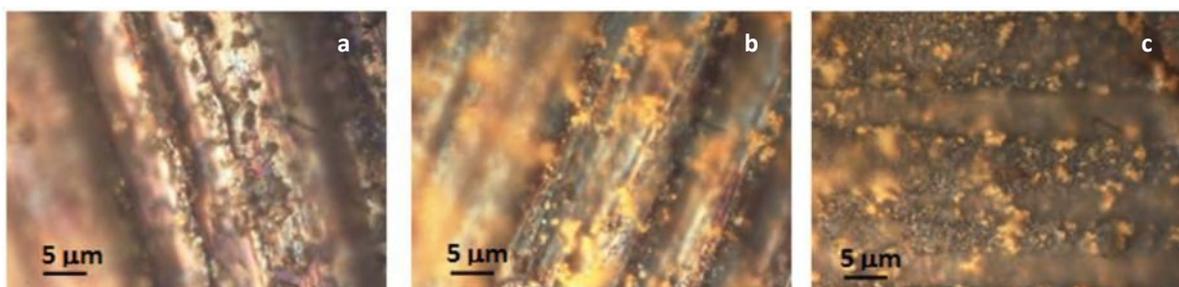


Figura 194. immagini al microscopio ottico dell'acciaio al carbonio prima del test di corrosione (a), dopo il test in $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ (b) e dopo il test in KNO_3 (c)

I nanoPCM a base di $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$

I nanoPCM a base di $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ sono stati prodotti aggiungendo una percentuale in peso dell'1% delle nanoparticelle elencate in Tabella 41.

Tabella 41. Composizioni PCM-nanoparticelle analizzate

Intervallo temperatura caratteristica	PCM Base (%p)	Nanoparticella			
		Tipo		Dimensione (nm)	Contenuto (%p)
200-300 °C Media	$\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ (54:46)	SiO_2	Aerosil300/Evonik	7	1
		Al_2O_3	Aeroxide AluC/Evonik	13	1
		$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	Aerosil Cok84/Evonik	2-200	1

Sono stati utilizzate due diverse metodologie per la preparazione dei campioni.

Nel primo metodo vengono effettuati i seguenti passi:

1. 198 mg di nitrato di potassio e nitrato di sodio e 2 mg di nanoparticelle sono stati misurati con una bilancia di precisione;
2. tutti i prodotti chimici sono stati poi scolti in 20 mL di acqua distillata;
3. questa soluzione di acqua, contenente l'1% di nanoparticelle nella miscela di sali, è stata sonicata nel sonicatore ad ultrasuoni per 100 minuti;
4. la soluzione acquosa è stata poi rapidamente evaporata su una piastra calda mantenuta a $200\text{ }^\circ\text{C}$ fino a completa evaporazione dell'acqua per circa 2 ore;
5. il campione secco è stato utilizzato per i successivi test.

Nel secondo metodo, i campioni sono stati preparati aggiungendo 0,1 g di nanoparticelle a 19,9 g miscela di sali con un estrusore bivate co-rotante modello Xplore 15 Compounder prodotto dalla DSM, il quale viene utilizzato generalmente per la miscelazione e l'estrusione dei polimeri. Tale macchinario consiste in un vano di miscelazione che contiene la doppia vite e lungo il quale si può variare il profilo di temperatura. I parametri del processo sono elencati in Tabella 42. Con questo metodo non si introduce più l'acqua come solvente, evitando un possibile cambiamento delle proprietà termiche dovute all'assorbimento d'acqua da parte dei sali.

Tabella 42. Parametri di miscelazione

Intervallo temperatura caratteristico	PCM Base (%p)	Parametri di miscelazione		
		Tmix	Tempo di mixing (min)	Velocità (rpm)
200-300 °C Media	NaNO ₃ -KNO ₃ (54:46)	300	15 e 30	100
		300	15 e 30	200

Test effettuati e proprietà analizzate

Sono state condotte prove di densità utilizzando una bilancia di precisione e un kit per prove di densità basato sul principio di Archimede per il PCM base. I campioni dei nanoPCM (e di PCM base) preparati con i due metodi sono stati analizzati attraverso calorimetria a scansione differenziale (DSC), pesando una quantità di circa 12 mg di materiale con una bilancia di precisione utilizzando un porta campioni in alluminio. I campioni sono stati sottoposti poi al seguente ciclo termico:

- 1° step: 150 °C per 5 min
- 2° step: 150 – 300 °C a 20 °C/min
- 3° step: 300 °C per 5 min
- 4° step: 300 – 150 °C a 20 °C/min.

Tale ciclo è stato effettuato sei volte per la ripetibilità del test e per annullare la storia termica del campione. Le proprietà termiche valutate sono: la temperatura di inizio fusione (T_{onset}), la temperatura di fusione (T_{fusione}), il calore di fusione (ΔH) e il calore specifico. I materiali dopo essere stati sottoposti ai cicli termici al DSC sono stati analizzati al microscopio a scansione per valutare la dispersione delle nanoparticelle nel sale.

Risultati 1° metodo

I risultati migliori riguardo il calore specifico sono stati ottenuti con l'aggiunta dell'1% di SiO₂-Al₂O₃. Le immagini al SEM dimostrano anche che la dispersione di tale nanoparticella nel PCM base è risultata migliore (Figura 195d). Inoltre c'è un aumento del calore di fusione aggiungendo nanoparticelle e una diminuzione della Tonset che si traduce in una fusione che inizia a temperature più basse.

Tabella 43. Calori specifici dei nanoPCM confrontati con il PCM base

	Cp medio Fase Solida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)	Cp medio Fase Liquida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)
PCM base (NaNO ₃ -KNO ₃)	1,604	----	1,648	----
PCM base + 1% SiO ₂	1,843	14,9	1,661	0,8
PCM base + 1% Al ₂ O ₃	1,923	19,9	1,745	5,9
PCM base + 1% SiO ₂ – Al ₂ O ₃	2,529	57,7	2,018	22,5

Tabella 44. calore di fusione, T onset e T di fusione dei nanoPCM analizzati

	ΔH fusione (J/g)	T _{onset} (°C)	T _{fusione} (°C)
PCM base (NaNO ₃ -KNO ₃)	110,01	219,88	227,63
PCM base + 1% SiO ₂	126,39	218,84	225,09
PCM base + 1% Al ₂ O ₃	127,11	219,25	225,39
PCM base + 1% SiO ₂ – Al ₂ O ₃	127,24	209,32	224,06

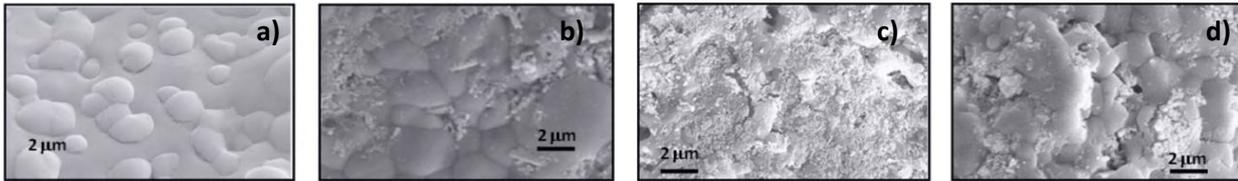


Figura 195. immagini SEM della dispersione ottenuta con il primo metodo a) PCM base b) PCM base + 1% SiO₂ c) PCM base + 1% Al₂O₃ d) PCM base + 1% SiO₂ - Al₂O₃

Risultati 2° metodo

I risultati migliori in termini di miglioramento della capacità termica sono stati ottenuti con l'1% di SiO₂-Al₂O₃ a 200 rpm. In questo caso il miglioramento è stato del 18-21%. La densità del PCM NaNO₃-KNO₃ è risultata pari a 1,8491 g/cm³ allo stato solido.

Tabella 45. Calori specifici dei nanoPCM confrontati con il PCM base

	Cpm Fase Solida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)	Cp medio Fase Liquida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)
PCM base (NaNO ₃ -KNO ₃) disidratato	1,760	-----	1,632	-----
PCM base + 1% SiO ₂ (@ 100 rpm)	1,384	-21,4	1,235	-24,3
PCM base + 1% SiO ₂ (@ 200 rpm)	2,021	14,8	1,543	-5,5
PCM base + 1% Al ₂ O ₃ (@ 100 rpm)	1,707	-3,0	1,457	-10,7
PCM base + 1% Al ₂ O ₃ (@ 200 rpm)	1,913	8,7	1,590	-2,6
PCM base + 1% SiO ₂ - Al ₂ O ₃ (@ 100 rpm)	2,040	15,9	1,640	0,5
PCM base + 1% SiO ₂ - Al ₂ O ₃ (@ 200 rpm)	2,128	20,9	1,932	18,4

Tabella 46. Calore di fusione, Tonset e T di fusione dei nanoPCM analizzati

	ΔH fusione (J/g)	T _{onset} (°C)	T _{fusione} (°C)
PCM base (NaNO ₃ -KNO ₃)	115,74	219,33	225,69
PCM base + 1% SiO ₂ (@ 100 rpm)	112,39	218,89	225,72
PCM base + 1% SiO ₂ (@ 200 rpm)	118,26	212,21	226,75
PCM base + 1% Al ₂ O ₃ (@ 100 rpm)	118,27	216,14	225,88
PCM base + 1% Al ₂ O ₃ (@ 200 rpm)	111,09	214,52	225,83
PCM base + 1% SiO ₂ - Al ₂ O ₃ (@ 100 rpm)	117,98	218,24	229,79
PCM base + 1% SiO ₂ - Al ₂ O ₃ (@ 200 rpm)	118,09	216,55	228,03

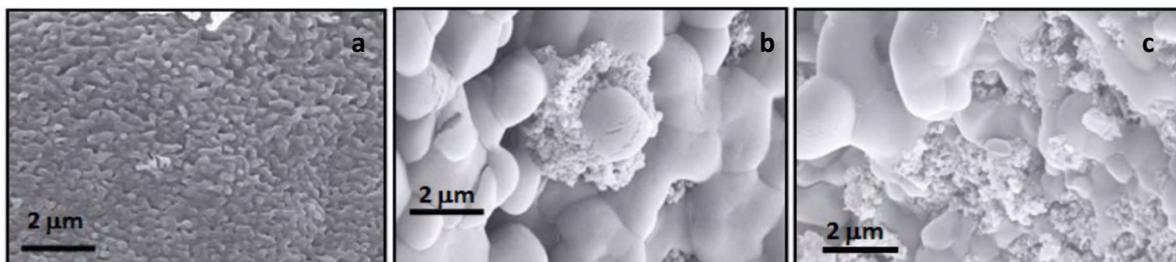


Figura 196. immagini SEM della dispersione ottenuta con il secondo metodo a) PCM base b) PCM base + 1% SiO₂ - Al₂O₃ @ 100 rpm c) PCM base + 1% SiO₂ - Al₂O₃ @ 200 rpm

I nanoPCM a base di KNO₃

Le composizioni PCM-nanoparticelle testate sono riportate Tabella 47.

Tabella 47. Composizioni PCM-nanoparticelle analizzate

Intervallo temperatura caratteristico	PCM Base (%p)	Nanoparticella		
		Tipo	Dimensione (nm)	Contenuto (%p)
300-400 °C Medio-alta	KNO ₃	SiO ₂	7	1
		Al ₂ O ₃	13	1
		SiO ₂ -Al ₂ O ₃	2-200	1

Il PCM base (KNO₃) è stato testato al DSC, al SEM e sono state condotte prove di densità utilizzando una bilancia di precisione e un kit per prove di densità basato sul principio di Archimede.

Il metodo di preparazione è lo stesso adottato per i PCM a base di NaNO₃-KNO₃ ed identificato come primo metodo. I campioni preparati sono stati analizzati al calorimetro pesando una quantità di circa 12 mg di materiale con una bilancia di precisione utilizzando un porta-campioni in alluminio.

I campioni sono stati sottoposti poi al seguente ciclo termico:

- 1° step: 250 °C per 5 min
- 2° step: 250 – 400 °C a 20 °C/min
- 3° step: 400 °C per 5 min
- 4° step: 400 - 250 °C a 20 °C/min.

Tale ciclo è stato effettuato sei volte per la ripetibilità del test e per annullare la storia termica del campione. Le proprietà termiche valutate sono: la temperatura di inizio fusione (T_{onset}), la temperatura di fusione (T_{fusione}), il calore di fusione (ΔH) e il calore specifico.

I materiali dopo essere stati sottoposti ai cicli termici al DSC sono stati analizzati al microscopio a scansione per valutare la dispersione delle nanoparticelle nel sale. I nanoPCM a base di KNO₃ sono stati prodotti secondo il primo metodo.

Le proprietà termiche sono elencate nelle tabelle successive. La densità del PCM KNO₃ è risultata pari a 1,9248 g/cm³ allo stato solido.

Tabella 48. Calore di fusione, T_{onset} e T_{fusione} dei nanoPCM analizzati

	ΔH fusione (J/g)	T _{onset} (°C)	T _{fusione} (°C)
PCM base (KNO ₃)	91,61	335,69	338,33
PCM base + 1% SiO ₂	102,46	333,70	332,43
PCM base + 1% Al ₂ O ₃	92,10	333,29	332,87
PCM base + 1% SiO ₂ – Al ₂ O ₃	82,90	333,94	334,77

Tabella 49. Calore di fusione, T_{onset} e T di fusione dei nanoPCM analizzati

	Cp medio Fase Solida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)	Cp medio Fase Liquida (J/g°C)	Incremento percentuale (%)
PCM base (KNO ₃)	1,010	---	0,966	---
PCM base + 1% SiO ₂	1,224	25,3	1,201	30,6
PCM base + 1% Al ₂ O ₃	1,068	9,3	1,043	13,4
PCM base + 1% SiO ₂ – Al ₂ O ₃	1,171	19,9	1,091	18,6

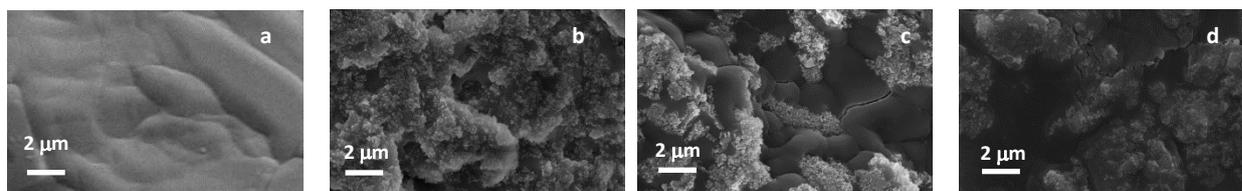


Figura 197. immagini SEM della dispersione ottenuta con il primo metodo a) PCM base b) PCM base + 1% SiO₂ c) PCM base + 1% Al₂O₃ d) PCM base + 1% SiO₂-Al₂O₃

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/081.

Sviluppo e caratterizzazione dei nanoPCM a bassa e alta temperatura

I nanoPCM a base di $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$

Per questi PCM l'intervallo di riferimento della temperatura di fusione è medio-bassa (circa 120 °C). La composizione della miscela ternaria PCM è 45 KNO_3 /18 NaNO_3 /37 LiNO_3 , in Figura 198 è riportato il valor medio del calore specifico in funzione della temperatura relativo alla miscela ternaria, pari a $1,58 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ nell'intervallo 250-400°C nei limiti del 5% dell'errore sperimentale. In Figura 199 è mostrato il punto di inizio fusione e solidificazione della miscela ternaria.

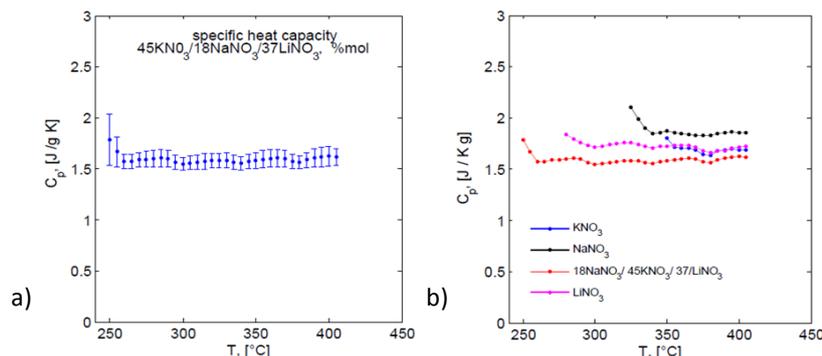


Figura 198. (a) Calore specifico medio della miscela ternaria nel range 250-400°C; (b) calore specifico miscela e componenti puri

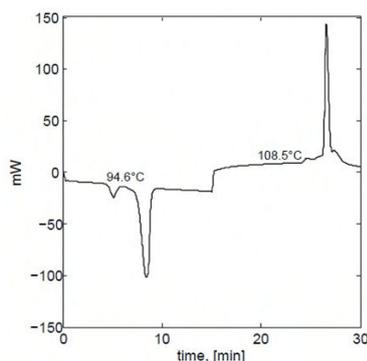


Figura 199. Punti di fusione e solidificazione della miscela ternaria con il litio

La viscosità della miscela ternaria con il litio è stata misurata con l'utilizzo di un reometro, i dati sperimentali sono riportati in scala semilogaritmica in funzione della temperatura in Figura 200. Nella figura sono riportati anche i dati di viscosità della miscela binaria 64 NaNO_3 /36 KNO_3 in moli. Sono stati valutati gli sforzi di taglio in funzione del gradiente di velocità delle due miscele di sali.

I nanoPCM a base di $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$

In ENEA, nell'ambito dello studio di nanoPCM, sono state preparate delle miscele di sali nitrati contenenti nanoparticelle di ossido di titanio TiO_2 e silice SiO_2 , nelle percentuali: binario + 1% TiO_2 ; binario + 3% TiO_2 ; binario + 1% SiO_2 ; binario + 3% SiO_2 ; binario + 2% SiO_2 , dove per binario si intende la miscela con composizione 64 NaNO_3 /36 KNO_3 % in moli. Sono riassunti i valori di calore specifico nell'intervallo di temperatura 260-400 °C. Inoltre sono stati misurati sperimentalmente i punti di fusione delle miscele PCM nano-caricate. In Tabella 50 sono riportati i valori medi dei calori specifici delle varie miscele analizzate.

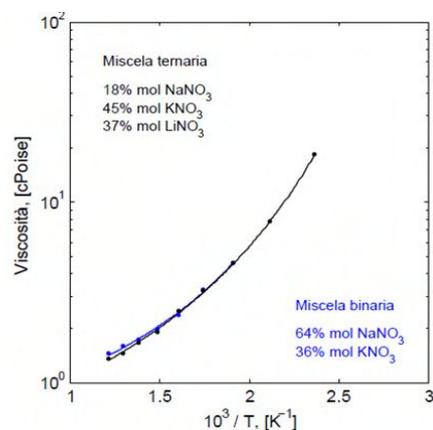


Figura 200. Viscosità in funzione della temperatura; miscela binaria (linea blu) nell'intervallo 250-550°C, miscela ternaria (linea nera) nell'intervallo 150-550°C

Tabella 50. Calore specifico medio delle miscele di sale binario con nanoparticelle

Miscela	C_p [J·g ⁻¹ ·°C]	% e _r
binario 1% TiO ₂	2,075	7,7 %
binario 3% TiO ₂	1,6	1%
binario 1% SiO ₂	1,9	6,4 %
binario 3% SiO ₂	1,9	3,84 %
binario 2% SiO ₂ 2% TiO ₂	1,81	6,6 %

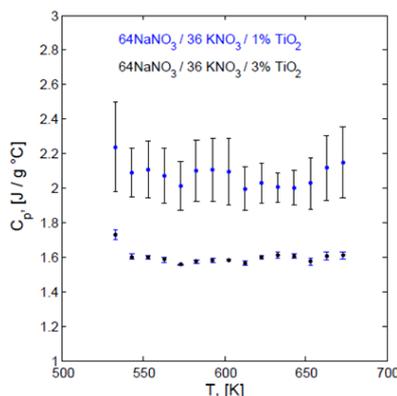


Figura 201. Calore specifico medio vs. la temperatura della miscela binaria con 1%TiO₂ (blu); e della miscela ternaria (nera) con il 3% di SiO₂ nell'intervallo 260-400°C

I PCM a base di Na₂CO₃-K₂CO₃

Le miscele PCM di carbonati (intervallo di riferimento: temperatura alta, 498-700°C) hanno la seguente composizione in moli 50% di Na₂CO₃ e 50% di K₂CO₃, la seconda contiene il 53% di Li₂CO₃ ed il 47% di Na₂CO₃. Queste miscele di carbonati hanno degli elevati punti di fusione, il calore specifico è stato misurato in un intervallo di temperatura in cui la miscela è ancora allo stato solido.

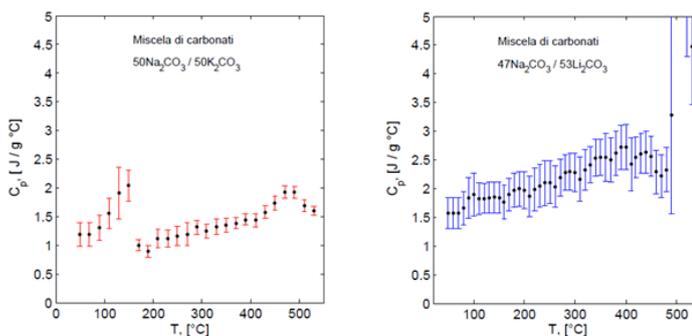


Figura 202. Calore specifico medio in funzione della temperatura della miscela 50/50 di Na₂CO₃-K₂CO₃, nell'intervallo 300-1000°C

Il calore specifico medio della miscela di carbonati al 50% in moli è pari a 1,17 J·g⁻¹ °C⁻¹ (Figura 202), ma con un errore relativo del 15%. Nel grafico di destra è riportato il calore specifico medio della miscela di carbonati con il 53% di litio, che risulta pari a 2,73 J·g⁻¹ °C⁻¹, l'errore relativo è del 21%. Inoltre, sono stati stimati i punti di fusione e solidificazione delle miscele di sali carbonati.

In questa attività di ricerca vanno ripetute le misure di capacità termica al fine di ottenere degli errori relativi che siano nei limiti del 5%. Per quanto riguarda le miscele di carbonati, l'elevato punto di fusione rende la misura del calore specifico più complessa a 700°C, per limiti operativi dello strumento.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/079.

Sviluppo e caratterizzazione dei nanoPCM per medio- bassa e alta temperatura

Nell'ambito dei così detti "sali solari" (miscele di KNO_3 e NaNO_3), è stato effettuato uno studio delle proprietà termofisiche (densità, calore specifico, diffusività e conducibilità) e della loro stabilità termica, utilizzando sia dati di letteratura che prove sperimentali. Sono stati inoltre analizzati dati ottenuti nei laboratori ENEA in merito alla determinazione della conducibilità termica effettuata tramite hot-wire method.

La disponibilità di proprietà termofisiche affidabili è importante per la modellazione e il dimensionamento dei sistemi di stoccaggio termico a sali fusi. I dati di letteratura (Figura 203) mostrano che queste proprietà differiscono in termini di incertezza. I valori di densità sono quelli che presentano la dispersione minima, i dati di capacità termica variano poco più del $\pm 5\%$ rispetto al valore medio, mentre la diffusività termica e conducibilità termica mostrano le variazioni più forti ($\pm 15\%$).

Per quanto riguarda la stabilità termica, le analisi termogravimetriche (Figura 204), confermano che le perdite di massa si verificano prevalentemente in un intervallo di temperatura da 500 a 600 °C. Sono meno stabili i sali LiNO_3 e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, nonché la miscela $\text{Ca,K,Na}/\text{NO}_3$. La stabilità delle miscele di sali $\text{K,Na}/\text{NO}_3$ (eutettico) e $\text{K,Li,Na}/\text{NO}_2,\text{NO}_3$ (80 °C) sono simili al singolo sale NaNO_3 . Quindi, la miscela di sali $\text{K,Li,Na}/\text{NO}_2,\text{NO}_3$ è un promettente candidato come fluido termovettore (HTF, Heat Transfer Fluid) grazie alla suo ampio intervallo operativo.

Per il sale solare, si è esaminata non solo la cinetica di formazione di nitriti ma anche la cinetica di formazione degli ossidi di metalli alcalini. Infatti, questi ossidi formano una soluzione alcalina se disciolti in acqua.

Mentre la principale reazione di decomposizione con formazione di nitriti nel fuso e rilascio di ossigeno è nota e ben compresa, al contrario, la reazione secondaria di decomposizione con formazione di ossidi di metalli alcalini e azoto/ossido di azoto è ancora non chiara, anche tenendo presente che gli ossidi nel fuso possono essere corrosivi.

Determinazione della conducibilità termica tramite Hot-Wire method

Il metodo del filo scaldante (hot-wire method) è una tecnica standard per la misura delle proprietà termiche dei materiali, in cui una sorgente lineare (una resistenza elettrica) si trova completamente immersa nella sostanza da analizzare. Inizialmente, la sorgente di potenza è spenta e la temperatura è uniforme.

Quando il filo è percorso da corrente, si inizia a sviluppare calore per effetto Joule. La temperatura del mezzo fluido in cui il filo scaldante è immerso crescerà con una legge temporale nota, variabile con la distanza dal filo, e dipendente dalla conducibilità termica. Misurando la variazione nel tempo della temperatura ad una certa distanza r dal filo scaldante si può determinare sperimentalmente la conducibilità. In alternativa, quando non sia possibile misurare la temperatura a distanza r dal filo, la misura di temperatura può essere condotta direttamente sul filo scaldante. Le prove preliminari sono state condotte in una apparecchiatura realizzata dall'ENEA costituita da un

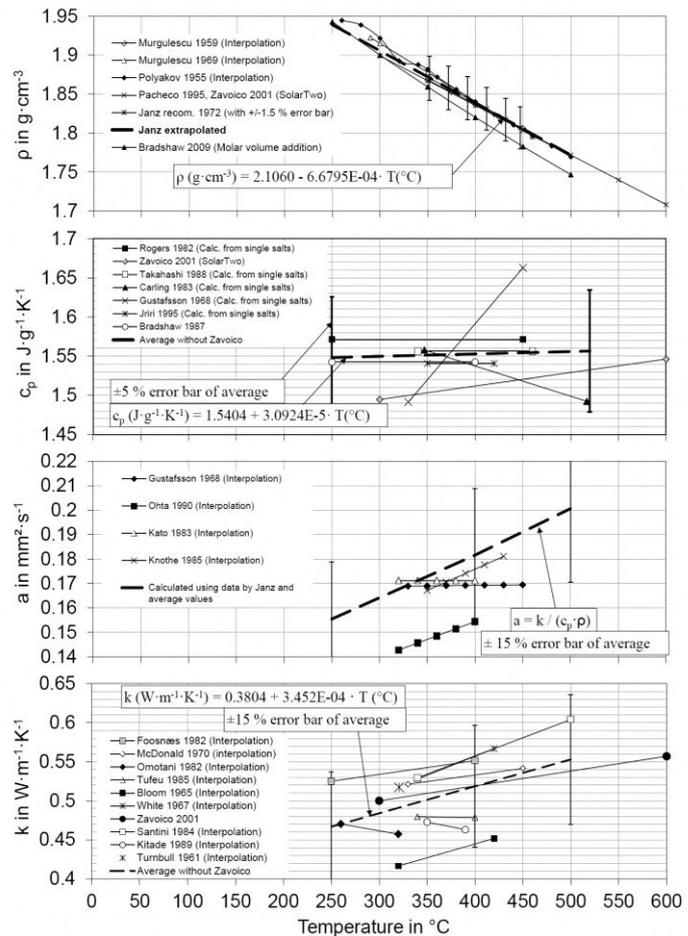


Figura 203. Dati di letteratura relativi a sali solari. Densità, calori specifici, conducibilità termiche e diffusività termiche in un ampio campo di temperatura

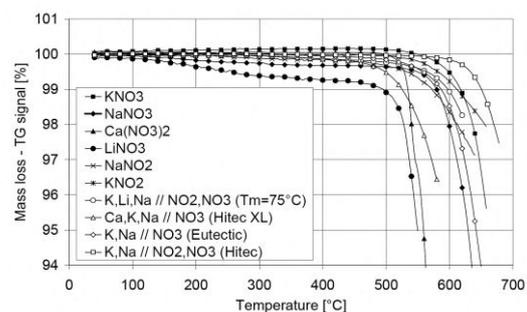


Figura 204. Analisi termogravimetrica di diversi sali solari

cilindro (cestello) in cui alloggiare il materiale di cui vuole determinarsi la conducibilità termica. Le dimensioni del cestello cilindrico sono diametro $d=12$ cm e altezza $H=20$ cm. Sperimentalmente viene misurata la temperatura T_{c3} all'esterno della guaina, e in due altri punti a distanza $R1$ e $R2$ dall'asse del cilindro (Figura 205).

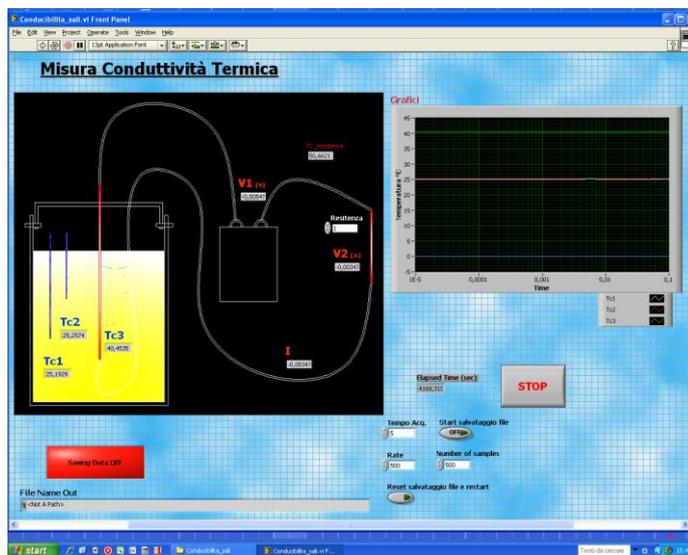


Figura 205. Schema dell'apparato sperimentale per la misurazione della conducibilità termica

I dati sperimentali forniti dall'ENEA consistono in una serie di misurazioni della temperatura T_{c3} in funzione del tempo per diversi e crescenti valori della tensione applicata al circuito DV1 come mostra la Figura 206 in cui la temperatura T_{c3} è riportata in funzione del $\log(t)$. Il fluido di riferimento utilizzato ai fini della verifica del funzionamento e della taratura dell'apparecchiatura è la glicerina.

In ogni caso, bisogna tener presente che l'utilizzo dell'apparecchiatura ai fini della determinazione della conducibilità di PCM non è così immediato. Si tenga infatti presente che i sali fusi sono conduttori elettrici e questo può determinare una dispersione elettrica (electrical leakage) attraverso il sale. Per questo i dati riportati in letteratura sulla conducibilità di sali fusi presentano variazioni significative fortemente dipendenti dall'apparecchiatura utilizzata e dalle condizioni operative.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/082.

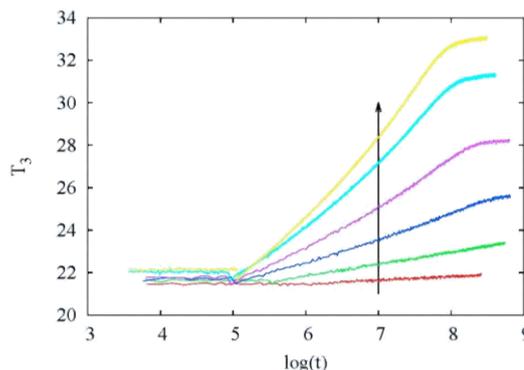


Figura 206. Temperatura della guaina T_{c3} vs $\log(t)$ per valori crescenti della tensione applicata al circuito DV1

Conclusioni

La caratterizzazione dei nanoPCM prodotti ha evidenziato come l'aggiunta di nanoparticelle al PCM di base ne abbia incrementato le proprietà termofisiche, ed in particolare la capacità termica specifica. Tale incremento si manifesta in modo più o meno marcato in funzione della tipologia delle nanoparticelle presenti. In molti studi, presenti in letteratura, si fa risalire questo comportamento anomalo (non sono più rispettate le leggi che regolano le miscele) alla creazione di una zona di transizione tra particella e solvente, il PCM, con elevate caratteristiche di scambio termico e di capacità di accumulo di energia. La presenza di dette zone, spesse circa 1 nm, unita alla enorme superficie di scambio associata alle particelle di dimensione nanometrica, consentono di alterare in modo significativo le caratteristiche termofisiche del mezzo di base. Inoltre, la fase sperimentale ha anche messo in evidenza l'importanza del rispetto di un ben definito protocollo di miscelamento al fine di assicurare la produzione di un nuovo mezzo di accumulo dalle caratteristiche termofisiche incrementate e non un semplice compound senza alcun effetto evidente.

I limiti temporali della presente attività non hanno permesso di approfondire alcuni temi di interesse e che dovranno necessariamente essere affrontati prima di passare ad una fase di progettazione più avanzata. In primo luogo, non è stato possibile avere conferma del contemporaneo aumento della diffusività termica dei nanoPCM. Tale misura è estremamente complessa, soprattutto quando eseguita su un mezzo in cambiamento di fase solido-

liquido, e necessita di attrezzature sofisticate e costose che in questo momento non sono in dotazione né ad ENEA né alle Università collaboranti. L'incremento di diffusività termica, secondo la bibliografia esistente, sarebbe legato alle stesse cause che producono quello del calore specifico ed è, quindi, lecito aspettarsi anche questa variazione di proprietà. Un altro aspetto fondamentale da approfondire è, ad esempio, la valutazione della stabilità nel tempo del nanoPCM a seguito i ripetuti ciclaggi termici e cambiamenti di fase. Questa attività, da condurre in laboratorio, richiede però dei tempi molto lunghi rispetto quelli a disposizione. Una parziale indicazione al riguardo si avrà probabilmente nella seconda parte di questo lavoro, quando si realizzerà il primo prototipo di elemento di accumulo completo e si effettuerà un adeguato numero di cicli carico-scarico. In conclusione, la presente attività ha dimostrato la possibilità di sviluppare un nuovo mezzo di accumulo a cambiamento di fase con capacità di accumulo e di scambio termico migliori, costituito da un PCM di base e da opportune nanoparticelle disperse. Tali caratteristiche permetteranno la concezione e lo sviluppo di un sistema di accumulo di dimensioni più compatte e con uno scambio termico efficiente. La progettazione di questo elemento base e la sua caratterizzazione sperimentale costituiranno i principali obiettivi della seconda fase di questa attività. Particolare attenzione dovrà essere posta nella scelta di un metodo di produzione del nanoPCM, che sia in grado di fornire in tempi brevi le quantità richieste (semi-industriale) mantenendo inalterate le caratteristiche del prodotto (rispetto dei protocolli).

Analisi di miscele di sali fusi con metodi ab-initio

Metodo e obiettivi

La crescente potenza di calcolo disponibile e i continui sviluppi nelle tecniche di calcolo permettono oggi di ricavare proprietà macroscopiche di materiali di interesse tecnologico partendo direttamente da simulazioni a livello atomico. In questo campo, particolare interesse hanno le tecniche di dinamica molecolare, che permettono di ricavare proprietà statistiche derivanti dal moto degli atomi; la dinamica molecolare ha da subito trovato applicazione al caso dei liquidi, dove il disordine e il moto degli atomi giocano un ruolo fondamentale.

La dinamica molecolare (MD) viene suddivisa in MD empirica e MD ab-initio. In entrambi i casi, i nuclei atomici sono trattati come oggetti classici che obbediscono alle equazioni di Newton. Nella MD empirica, le interazioni tra essi sono date da potenziali classici introdotti dall'esterno, che riproducono sia l'interazione tra i nuclei, sia l'effetto degli elettroni intorno ad essi; i potenziali vengono determinati ipotizzando una loro espressione parametrica e fittando i dati sperimentali. Il calcolo si riduce a un problema puramente classico, e la sua validità dipende dalla validità dei potenziali scelti. Nella MD ab-initio, invece, non si usa alcun dato sperimentale, e le forze tra i nuclei vengono calcolate risolvendo il problema elettronico ad ogni passo della simulazione, e calcolando le forze dovute alla configurazione elettronica; il metodo è più generale, non ha problemi di applicabilità, e permette di calcolare quantità dipendenti dalla configurazione elettronica, ma può simulare un numero molto minore di atomi rispetto ai metodi empirici.

All'interno della MD ab-initio, i due metodi più usati sono il metodo di Born-Oppenheimer (BOMD), in cui la configurazione elettronica viene ricalcolata in modo esatto ad ogni passo della simulazione, e il metodo di Car-Parrinello (CPMD), in cui la configurazione elettronica è calcolata all'inizio e poi fatta evolvere in modo approssimato, per risparmiare tempo di calcolo. CPMD è un metodo più veloce, ma va applicato con attenzione evitando casi critici che possono mettere in crisi le approssimazioni su cui si basa. BOMD è un metodo più robusto.

L'ENEA dispone di una buona potenza di calcolo (infrastruttura CRESCO) che permette di eseguire interessanti simulazioni ab-initio di sistemi contenenti fino ad alcune centinaia di atomi. Per questo si è deciso di applicare le tecniche a sali fusi di interesse per applicazioni solari, cominciando dalla classica miscela di nitrati $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$.

Il software usato (Quantum ESPRESSO) è un software open-source che permette di eseguire calcoli di dinamica molecolare, sia BOMD che CPMD. Nel caso dei sali fusi non vi sono particolari problemi nell'applicazione del metodo CPMD, che quindi è stato scelto.

Lo scopo del calcolo è ottenere un modello atomico affidabile della miscela di sali allo stato liquido, su cui sarà possibile andare a "misurare" quantità microscopiche e macroscopiche. La temperatura del modello può essere fissata inserendo un termostato (esistono diversi modi per farlo). In particolare, si possono ottenere informazione sulle seguenti quantità (e sulla loro dipendenza dalla temperatura):

- densità
- PDF (Pair Distribution Function: fornisce informazioni sulla distanza media tra i vari tipi di atomi)
- numeri di coordinazione nel liquido
- distribuzione angolare degli ioni Na / K rispetto ai gruppi NO_3
- stabilità dei gruppi NO_3 (importante per studiare la decomposizione in nitriti)
- viscosità

- conducibilità elettrica (ionica ed elettronica).

Lo studio della dipendenza di queste quantità dalla composizione e dalla temperatura può essere svolto in modo puramente teorico.

Un passo successivo, anche se di più difficile realizzazione, è lo studio dei cambiamenti di fase, che permetterebbe di prevedere le temperature di solidificazione di diverse miscele. Lo studio richiederà però maggiore sforzo di calcolo con numero di atomi maggiore, e potrebbe non essere accessibile a metodi ab-initio (in tal caso si potrebbe utilizzare la MD empirica).

Stato dei lavori

L'applicazione di metodi ab-initio richiede un considerevole lavoro preliminare per la scelta degli algoritmi da usare, dei metodi di soluzione del problema elettronico (funzionali DFT, basi da usare, pseudopotenziali) e dei parametri della simulazione (cutoff energetico per il problema elettronico, numero di atomi). Per far ciò, la simulazione dei sali solidi NaNO_3 e KNO_3 è stata effettuata e i risultati sono stati confrontati con i dati sperimentali di letteratura.

I due sali (a temperature prossime alla fusione) presentano struttura cristallina esagonale molto simile e piuttosto complessa, con 30 atomi nella cella fondamentale per NaNO_3 , e struttura con un leggero grado di disordine per KNO_3 . I calcoli sono stati fatti permettendo agli atomi di muoversi fino a raggiungere le posizioni di equilibrio, e permettendo alla cella di simulazione di cambiare forma e volume, in modo da studiare il volume d'equilibrio. Questo lavoro ha permesso di scegliere metodi e parametri di simulazione che riproducono il cristallo con errori inferiori all'1% sulle dimensioni dei lati della cella cristallina, e le posizioni degli atomi nella cella con errori simili. La possibilità di ottenere buoni risultati con metodi ab-initio su questi composti è perciò dimostrata.

Il secondo passo è stata la produzione di un plausibile campione di liquido. In una cella cubica sono stati inseriti 270 atomi (54 Na, 54 N, 162 O) componenti il sale di sodio. Gli atomi di N e di O sono stati disposti formando la tipica struttura degli NO_3 , poiché questa struttura non si decompone nel sale liquido. Un apposito programma è stato scritto per permettere l'inserimento dei gruppi NO_3 e degli atomi Na in modo il più possibile casuale, ma con distribuzione il più possibile uniforme, e mantenendo l'unità dei gruppi NO_3 .

In seguito, la struttura ottenuta è stata inserita nel programma di simulazione, facendo partire alcuni test con metodo CP. Le prime simulazioni non hanno significato fisico e sono destinate a trovare parametri della simulazione CP che consentano calcoli stabili, a trovare la struttura elettronica di partenza e a rilassare la configurazione degli atomi e il volume della cella, per raggiungere configurazioni fisicamente plausibili. Al termine di questo processo si è ottenuto un plausibile campione di sale liquido, di 270 atomi, su cui è possibile iniziare simulazioni fisicamente più significative (e a temperatura fissata) per ottenere le quantità da calcolare. Per simulare miscele dei due tipi di sali, è sufficiente sostituire un certo numero di atomi Na con atomi K e rilassare di nuovo la cella.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/079.

c. Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

Le attività hanno riguardato, nel caso di applicazioni del solare termodinamico ad impianti co-generativi di piccola taglia (< 1 MWe), lo studio e la progettazione di sistemi per generazione di energia elettrica di piccole dimensioni basati sull'esclusivo uso di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo. Utilizzando come sistema di accumulo il serbatoio a sali fusi dell'impianto PCS (Prova componenti solari) ed il suo generatore di vapore interno, sono state analizzate diverse soluzioni e selezionata la migliore tra queste, è stato realizzato il progetto preliminare dell'impianto.

L'attività è stata condotta, per quanto riguarda la parte sperimentale presso i laboratori ENEA, mentre l'Università di Roma Tre si è occupata della fase di studio e progettazione dell'impianto di produzione.

c.1 Caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo a sali fusi dell'impianto sperimentale PCS del C.R. Casaccia dell'ENEA

Nel contesto delle energie rinnovabili, caratterizzate principalmente dalla natura incerta e volatile della sorgente di energia, uno dei requisiti più importanti che si richiedono alle varie tecnologie è la capacità di immagazzinare in maniera rapida, economica ed efficiente l'energia raccolta per distribuirla utilmente nei periodi di assenza della sorgente stessa. Ogni concetto di sistema di accumulo termico, si propone di raccogliere l'energia solare al fine di poter traslare la sua consegna ad un secondo momento o per livellare la produzione dell'impianto durante la sua possibile intermittenza di funzionamento dovuta a condizioni meteorologiche (es. tempo nuvoloso). In questo

modo la capacità di generazione di energia di un sistema CSP può essere esteso oltre i periodi di presenza di radiazione solare, minimizzando così anche il ricorso a combustibili fossili o combustibili rinnovabili in caso di sistemi ibridi o di backup. Nell'ambito dei sistemi di accumulo termico l'ENEA ha sviluppato una soluzione innovativa, rispetto al classico sistema a doppio serbatoio (Figura 207a), per la prossima generazione di impianti solari, che dovrebbe fornire un servizio efficiente, affidabile ed economico per impianti CSP, specialmente in applicazioni di piccola e media taglia (Figura 207b). In questo sistema è utilizzato un unico serbatoio con il generatore di vapore integrato al suo interno. L'integrazione di questi componenti può potenzialmente portare ad una notevole semplificazione dei circuiti termoidraulici (e conseguentemente della gestione dell'impianto) e di conseguenza ad una riduzione dei costi.

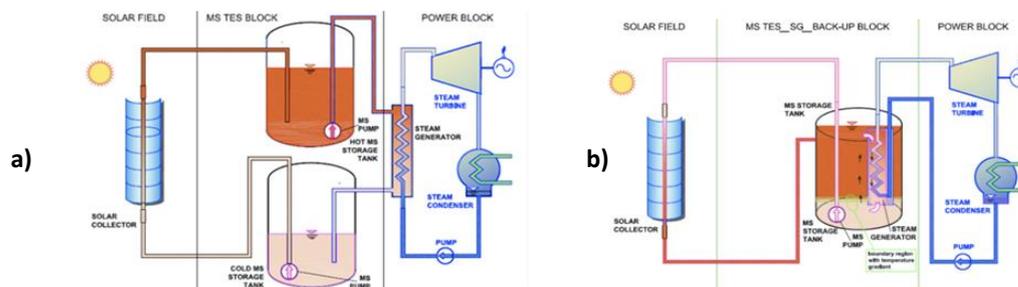


Figura 207. Due diverse possibili configurazioni di impianti solari CSP

Tuttavia in un sistema a unico serbatoio è difficile separare il fluido caldo immagazzinato da quello freddo ma, a causa della differenza di densità in funzione della temperatura, ogni fluido stratifica naturalmente nel serbatoio disponendosi da strati più freddi in basso a strati più caldi in alto. Nel caso di utilizzo di una miscela di sali fusi come mezzo di accumulo, si sfruttano le caratteristiche proprietà chimico-fisiche dei sali fusi stessi per favorire la stratificazione, che può essere ottenuta e mantenuta grazie al basso valore della loro conducibilità termica; infatti, a causa di questo basso valore, i sali si comportano come un isolante termico impedendo la conduzione di calore da un livello all'altro. L'effetto della trasmissione di calore per convezione tra i vari strati, che può essere indotta dalle perdite termiche verso l'ambiente, può essere notevolmente ridotta mediante un buon isolamento. Inoltre, il generatore di vapore integrato funge da elemento attivo che induce e mantiene nel tempo la stratificazione dei sali.

A fronte di queste caratteristiche, è necessario testare sperimentalmente e provare la fattibilità e le capacità operative del sistema proposto. Per l'effettuazione delle prove sperimentali di caratterizzazione del sistema proposto è stato utilizzato il serbatoio di accumulo termico a sali fusi presente nell'impianto sperimentale PCS del Centro Ricerche ENEA Casaccia (Tabella 51).

L'attività sperimentale prevede di raccogliere, attraverso l'esecuzione di appropriati e specifici test sperimentali, i dati necessari alla sua completa caratterizzazione: temperature di parete del serbatoio, temperature di stratificazione dei sali fusi al suo interno, calore disperso nel tempo attraverso la coibentazione, potenza elettrica necessaria al mantenimento della temperatura, misura del livello dei sali fusi, ecc.. Una volta effettuata la validazione, i risultati sperimentali saranno utilizzati per il dimensionamento e la progettazione del sistema proposto.

Tabella 51. Dati principali dell'Impianto sperimentale PCS

Descrizione	valori
Tipo di fluido	Miscela sali: 40% KNO_3 – 60% NaNO_3
Portata min / max, kg/s	2,5 / 6,6
Temperatura min / max, °C	270 / 550
Pressione mandata pompa, MPa	0,8
Serbatoio di accumulo:	
- diametro, m	2
- altezza, m	2,8
- pressione progetto, MPa	2
- potenza elettrica riscaldatori, kW	100
- quantità di sali stoccata, Mg	~12
Potenza elettrica max caldaia, kW	400
Potenza termica max aerotermini, kW	100
Lunghezza nominale SdP, m	100
Superficie utile specchi SdP, m ²	540

Le prove sperimentali effettuate finora hanno riguardato principalmente: i transitori di raffreddamento del serbatoio e la stratificazione del serbatoio in condizioni di riposo e operative in fase di scarica del contenuto energetico dei sali fusi.

Raffreddamento del serbatoio di accumulo

In particolare sono stati analizzati i transitori di raffreddamento del serbatoio di accumulo, che è riportato schematicamente in Figura 208, e i cui dati principali sono indicati in Tabella 51. Tra le varie misure di temperatura disponibili sulle pareti del serbatoio e nella massa dei sali fusi, si prendono in esame quelle corrispondenti ad una sezione orizzontale del serbatoio posta circa alla metà del livello liquido nominale (in modo tale da minimizzare le influenze degli effetti di bordo); tali punti di misura sono posizionati uno sulla parete esterna, e gli altri due immersi nei sali fusi a 10 cm e a 30 cm dalla parete interna.

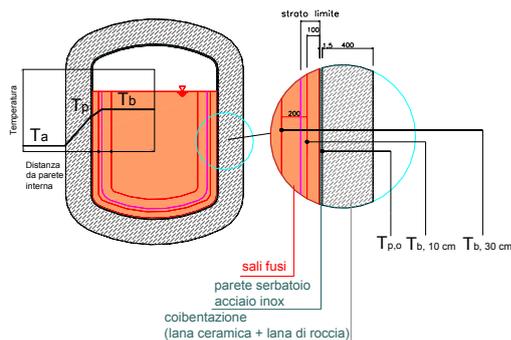


Figura 208. Schema del serbatoio di accumulo con indicazione delle posizioni delle misure di temperatura

I transitori in esame sono stati ottenuti lasciando raffreddare i sali accumulati da una temperatura media di 420 °C fino a 290 °C (temperatura alla quale interviene il sistema di riscaldamento esterno); dalla loro analisi si evidenzia la tendenza alla stratificazione termica verticale ma soprattutto anche trasversale del fluido, come evidenziato dai profili di Figura 209, dove sono riportati i valori delle temperature nei punti di misura suddetti, con il tempo di raffreddamento come parametro. Dai valori misurati si possono ricavare il flusso termico locale, sulla sezione orizzontale di riferimento, e la temperatura in funzione della distanza dalla parete esterna del serbatoio. Dalla Figura 209 si può osservare come lo strato limite aumenti al diminuire della temperatura dei sali nel serbatoio (con il passare del tempo); è prevedibile che proseguendo il transitorio, senza far intervenire i cavi scaldanti di mantello del serbatoio, lo spessore limite e la temperatura dei sali raggiungano un valore critico, per il quale inizia la formazione di uno strato congelato solido sulla parete interna, crescente con il tempo. Tale fenomeno determina un notevole aumento della resistenza alla dispersione del calore dai sali più interni, e contrasta il loro congelamento. Per inciso, se si considerano i flussi termici trasversali associati alla stratificazione dei sali, si avrebbero dei valori di potenza dispersa dalle pareti del serbatoio circa sei volte inferiori a quelli calcolati come variazione dell'energia associata alla capacità termica dei sali nel serbatoio nel transitorio (Figura 210).

Gli andamenti osservati dimostrano che le perdite termiche del serbatoio a riposo possono essere ridotte notevolmente riducendo al minimo i "ponti termici" delle apparecchiature utilizzate e che il

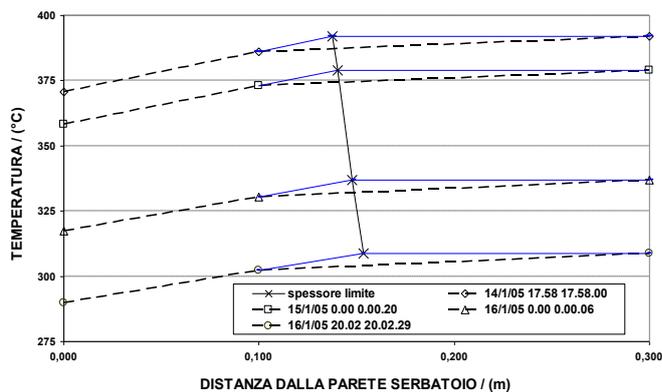


Figura 209. Andamenti delle temperature di parete e di "bulk" con indicazione dello spessore limite

è prevedibile che proseguendo il transitorio, senza far intervenire i cavi scaldanti di mantello del serbatoio, lo spessore limite e la temperatura dei sali raggiungano un valore critico, per il quale inizia la formazione di uno strato congelato solido sulla parete interna, crescente con il tempo. Tale fenomeno determina un notevole aumento della resistenza alla dispersione del calore dai sali più interni, e contrasta il loro congelamento.

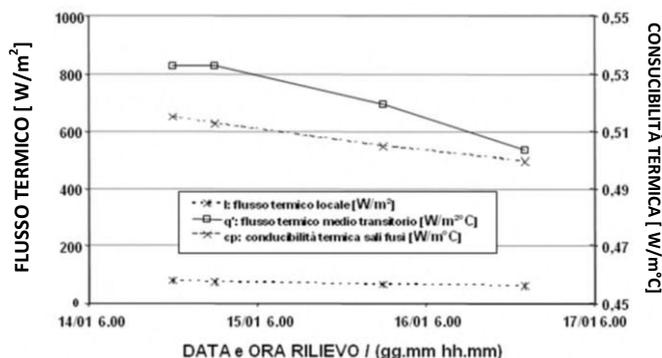


Figura 210. Andamenti dei flussi termici locale (a metà serbatoio) e medio durante il transitorio di raffreddamento

fenomeno della stratificazioni dei sali aiuta a diminuirle. Sono in preparazioni specifiche prove per analizzare il campo termico dei sali fusi all'interno del serbatoio sia in condizioni di riposo che di "agitazione".

Stratificazione dei sali fusi

Le prove sperimentali sull'innescare della stratificazione dei sali fusi contenuti nel serbatoio di accumulo sono state effettuate inizialmente in condizioni di scarica termica del contenuto energetico del serbatoio stesso. In sostanza il fluido nel serbatoio è stato portato, tramite gli appositi riscaldatori elettrici inseriti nei sali fusi, alla desiderata temperatura di prova; a quel punto, sono state effettuate due diverse serie di prove in condizioni differenti in particolare: senza e con l'inserimento del generatore di vapore (GV).

Il generatore di vapore consiste in uno scambiatore di calore di tipo "once-through" a mantello e fascio tubiero elicoidale. La potenza scambiata in condizioni nominali (temperatura di ingresso dei sali= 550°C; temperatura di uscita dei sali= 290 °C; pressione dell'acqua/vapore ≤ 55 bar; temperatura di ingresso dell'acqua ≤ 220 °C; portata dell'acqua ≤ 0,12 kg/s) è di 300 kW. Il funzionamento del GV è a circolazione naturale lato acqua che passa, spinta da una pompa di circolazione, all'interno dei tre tubi elicoidali che formano il fascio tubiero, e a circolazione naturale lato sali che invece, entrando in un passaggio con sezione a corona circolare nella parte superiore dello scambiatore, vengono a contatto con la parete più fredda dei tubi del fascio e raffreddandosi, aumentano di densità e quindi innescano la circolazione.

Prima serie di prove sperimentali

La prima serie di prove è consistita nel lasciare che il serbatoio, una volta portato alla temperatura desiderata per la prova, si raffreddasse a causa delle dispersioni termiche verso l'ambiente esterno, dispersioni che ovviamente esistono nonostante la coibentazione posta sulle pareti esterne del serbatoio. Queste prove sperimentali sono

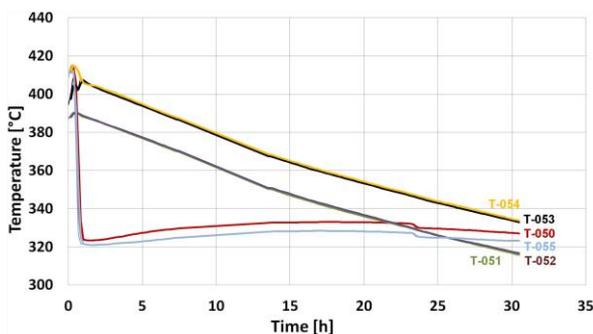


Figura 211. Andamenti delle temperature degli strati di sali fusi in una prova di raffreddamento del serbatoio

servite a verificare per quanto tempo, lasciato il sistema a se stesso, si mantiene la stratificazione della miscela di sali.

Dai risultati ottenuti (Figura 211) si evidenzia che anche se il serbatoio dell'impianto PCS presenta un elevato rapporto superficie di scambio/volume a causa delle sue limitate dimensioni (h= 2,8 m; d= 2 m), rimane sufficientemente stabile nelle sue condizioni di stratificazione dei sali contenuti. È incoraggiante per i sistemi più grandi dove i serbatoi hanno dimensioni notevolmente maggiori (altezza fino a 10 m e diametro fino a 30 m) e quindi presentano un rapporto superficie di scambio/volume molto più basso. Questo significa che, per i sistemi più

grandi rispetto a quello sperimentale esaminato, le perdite termiche verso l'ambiente esterno saranno più basse e quindi anche la stratificazione dei sali fusi si manterrà per un tempo notevolmente più lungo.

Seconda serie di prove sperimentali

Nella seconda serie di prove sperimentali è stato studiato il comportamento del sistema integrato serbatoio/generatore, ma sempre in condizioni di sola scarica termica del contenuto energetico dei sali. Una volta raggiunta la temperatura di prova, è stato avviato il generatore di vapore da 300 kW inserito nel serbatoio e immerso nei sali; il generatore ha iniziato a scambiare calore assorbendo energia termica dai sali per produrre vapore, e quindi raffreddando i sali stessi.

Durante le prove sono state registrate le grandezze caratterizzanti il funzionamento dell'intero sistema integrato serbatoio/GV: portate dell'acqua, temperature, pressioni di lavoro, perdite di carico, ecc.

La Figura 212 mostra, per una prova di scarico termico effettuata a partire da una temperatura iniziale dei sali di 500 °C, l'andamento delle

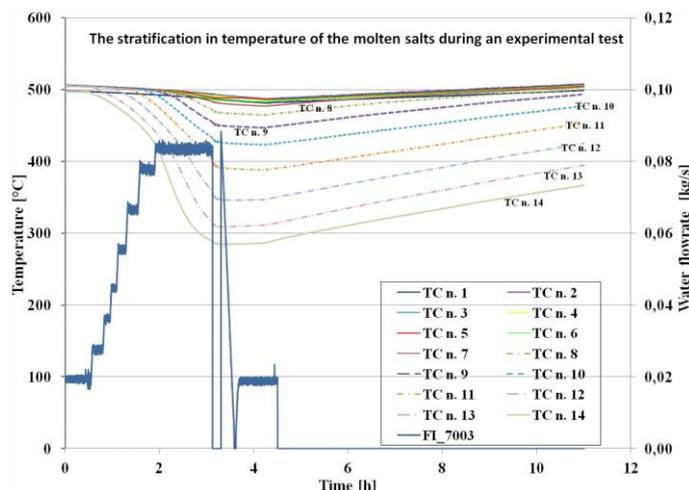


Figura 212. Andamento delle temperature di stratificazione dei sali fusi durante una prova sperimentale

temperature dei diversi strati dei sali, misurate da 14 termocoppie. Queste sono poste "a pettine" lungo un tubo immerso dall'alto nei sali, per misurare ogni 10 cm la temperatura degli strati di fluido lungo l'altezza del serbatoio. In figura 212 è riportata anche la misura della portata dell'acqua nei tubi del GV, indicata con la sigla FI_7003, da leggere sul secondo asse Y. Ogni punto sperimentale è acquisito dal sistema di acquisizione dati ogni 5 secondi.

Si vede che, quando il GV comincia a funzionare e a scambiare calore con i sali fusi (circa a ½ ora dall'inizio della prova), la massa dei sali contenuti nel serbatoio comincia a raffreddarsi poiché i sali escono freddi dal GV nel fondo del serbatoio. Poiché il sistema è chiuso, cioè è in condizioni di "scarico termico" del serbatoio in quanto i sali, non ricircolando all'esterno, non vengono reintrodotti riscaldati nella zona calda più elevata del serbatoio, l'intero sistema tende a raffreddarsi mantenendo una stratificazione in cui la zona di transizione caldo/freddo aumenta di altezza nel corso del tempo in quanto il GV continua a operare sottraendo calore dal sistema. A circa 3 ore dall'inizio della prova la pompa dell'acqua si arresta, il riscaldatore elettrico all'interno del serbatoio comincia a funzionare e le temperature dei diversi strati di sali ricominciano a salire e tendono a raggiungere il valore precedente, che sarà poi raggiunto durante la notte.

I due esempi riportati (Figure 211 e 212) danno un'idea della possibilità di creare una stratificazione nei sali fusi accumulati nel serbatoio, e anche (Figura 212) che un GV introdotto all'interno del serbatoio si comporta come un elemento attivo che migliora questo fenomeno. La zona di transizione calda/ fredda è denominata zona "termoclina", e le sue caratteristiche e comportamenti (altezza, spostamento verso l'alto e verso il basso durante le fasi rispettivamente di scarica e ricarica calore ecc) saranno valutate successivamente mediante ulteriori prove sperimentali.

Conclusioni

L'attività sperimentale finora svolta da ENEA ha portato a una prima caratterizzazione quali-quantitativa delle caratteristiche termoidrauliche e del comportamento operativo di un sistema di accumulo di nuova concezione, consistente in un serbatoio di accumulo integrato con un generatore di vapore di tipo "once-through". Le prove sperimentali, che sono state effettuate sull'impianto PCS, consentono di affermare che le ipotesi alla base del nuovo sistema integrato proposto, sotto elencate:

- possibilità di configurare una centrale solare a concentrazione con un unico serbatoio invece dei due della concezione classica;
- possibilità della creazione e del mantenimento nell'unico serbatoio di una stratificazione dei sali;
- possibilità di integrazione del sistema con un generatore di vapore immerso di tipo "once-through" a circolazione naturale lato sali;
- possibilità di ottenere vapore surriscaldato nelle quantità/qualità desiderate,

possono essere considerate fattibili, realistiche e meritevoli di ulteriori approfondimenti.

La realizzazione in grande scala di sistemi di accumulo/generazione di vapore simili a quello proposto permetterebbe di ottenere una serie di vantaggi, quali compattezza delle soluzioni tecnologiche, modularità dei sistemi, semplicità di gestione operativa, efficienza nelle prestazioni e costi contenuti. Queste qualità, di fondamentale importanza per i sistemi di accumulo e generazione di vapore di grandi impianti solari ad alta temperatura, saranno verificate nelle prove sperimentali tuttora in corso.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/2013/080.

c.2 Studio e progettazione di impianti di cogenerazione innovativi di piccola taglia alimentati da sistemi di accumulo termico a sali fusi di impianti solari a concentrazione

Questa attività è stata interamente sviluppata dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma Tre. E' stata condotta un'indagine preliminare sulla fattibilità di differenti soluzioni per l'utilizzazione energetica del calore dei sali fusi, alla luce della disponibilità merceologica di macchine utilizzabili nella taglia compresa fra 15 e 100 kW_e. Questa analisi ha orientato la scelta nell'ambito delle macchine a vapore, per le criticità emerse legate all'impiego di motori Stirling nell'applicazione considerata. Sono state quindi condotte attività volte a delineare le caratteristiche di massima di un impianto motore a vapore d'acqua per produzione di potenza elettrica in assetto cogenerativo.

Sulla base delle caratteristiche del vapore reso disponibile da tali impianti, sono state analizzate le diverse tipologie di macchina motrice di possibile impiego (turbine, espansori volumetrici). In particolare, l'indagine merceologica ha evidenziato che la taglia commerciale degli espansori volumetrici diviene compatibile con portata di vapore sostanzialmente maggiore di quella tipica dei sistemi solari termodinamici a cui si fa riferimento. Alla

luce di questo aspetto, è stato effettuato il dimensionamento di massima dell'impianto basato sull'impiego di una turbina a vapore.

Nel caso in esame, la produzione del vapore surriscaldato è affidata ad un generatore accoppiato ad un impianto solare termodinamico. Un flusso di sali fusi entra nel generatore di vapore alla temperatura di 500 °C e ritorna al campo solare ad una temperatura non inferiore a 290 °C. Il vapore viene reso disponibile fino alla pressione di 55 bar, mentre i diversi livelli di surriscaldamento del vapore dipendono dalla temperatura dei sali fusi all'interno del serbatoio d'accumulo, all'interno del quale viene intrattenuta una circolazione forzata.

Con riferimento ad un assetto cogenerativo dell'impianto a vapore, si è assunto che le condizioni al condensatore (pressione 0,701 bar assoluti e 90°C) siano determinate dai livelli di temperatura dell'acqua di refrigerazione. In particolare, è stato scelto l'intervallo di temperatura di 20 °C compreso fra 70 e 80 °C, rappresentativo delle usuali applicazioni nei settori agricolo, alimentare e industriale. D'altra parte si è considerato che, per finalità sperimentali, l'impianto venga corredato di uno scambiatore aerotermo che assolva le medesime funzioni del carico. E' stata anche condotta una valutazione delle prestazioni pensando ad un differente assetto di cogenerazione, con una condensazione un poco più spinta, portandone la temperatura a 60 °C.

E' stato effettuato il dimensionamento di massima di due impianti, uno di potenza pari a 100 kWe e l'altro di 15 kWe prendendo come riferimento una turbina Curtis del costruttore Dresser Rand (modelli RVHA15 e RVHA12).

E' stato effettuato un dimensionamento di massima dei principali componenti d'impianto (desurriscaldatore, condensatore e aerotermo). Per la scelta dei componenti si è presa in considerazione la condizione di funzionamento corrispondente alla temperatura di 500 °C dei sali fusi, per due possibili livelli di pressione 55 bar e 40 bar.

Per l'impianto di potenza pari a 100 kWe, di cui si ritiene significativo puntare l'attenzione sugli aspetti relativi al rendimento e all'impegno realizzativo dell'impianto prova, nelle Tabelle 52-54 si riportano i principali dati relativi a due possibili assetti dell'utenza termica prevista a valle della turbina, le caratteristiche del condensatore e le caratteristiche dell'aerotermo.

Tabella 52. Caratteristiche e prestazioni della turbina a vapore Dresser Rand modello RVHA15

Temp. ingresso vapore [°C]	Temp. condensazione vapore [°C]	55 bar		40 bar	
		Consumo di vapore [kg/h]	η_{ei} stimato	Consumo di vapore [kg/h]	η_{ei} stimato
100 kW @ 9000 RPM					
480	60	644	0,178	666	0,171
430	60	683	0,175	706	0,168
380	60	727	0,171	750	0,164
320	60	789	0,168	809	0,161
280	60	842	0,165	855	0,158
100 kW @ 3000 RPM					
480	90	766	0,156	801	0,148
430	90	818	0,152	856	0,144
380	90	874	0,149	914	0,141
320	90	955	0,145	993	0,137
280	90	1024	0,143	1054	0,135
100 kW @ 3000 RPM					
480	60	716	0,160	740	0,153
430	60	759	0,157	785	0,151
380	60	808	0,154	833	0,147
320	60	876	0,151	899	0,144
280	60	936	0,149	950	0,142
100 kW @ 3000 RPM					
480	90	852	0,140	891	0,133
430	90	909	0,137	951	0,135
380	90	972	0,134	1017	0,120
320	90	1061	0,131	1104	0,117
280	90	1138	0,129	1172	0,116

Tabella 53. Dimensionamento di massima del condensatore

sezione di desurriscaldamento			
Temp. del vapore in ingresso [°C]	Temp. di condensazione vapore [°C]	Temp. dell'acqua di refrigerazione [°C]	Temperatura "approaching" [°C]
212	90	70	80
Coefficiente tipico di scambio termico in desurriscaldamento [kW/m ² °C]		Potenza termica scambiata [kW]	Superficie di scambio termico [m ²]
0,125		54	7,2
Portata d'acqua nel desurriscaldatore [kg/s]			
1,3			
sezione di condensazione			
Temp. del vapore in ingresso [°C]	Temp. di condensazione vapore [°C]	Temp. dell'acqua di refrigerazione [°C]	Temperatura acqua in uscita dal condensatore [°C]
90	90	70	80
Coefficiente tipico di scambio termico in condensazione [kW/m ² °C]		potenza termica scambiata [kW]	Superficie di scambio termico [m ²]
5,5		508	6,6
Portata d'acqua di refrigerazione nel condensatore [kg/s]			
12,2			

Tabella 54. Dimensionamento di massima dello scambiatore aerotermo

scambiatore aerotermo			
Temp. dell'acqua in ingresso [°C]	Temp. dell'acqua in uscita [°C]	Temperatura aria ambiente [°C]	Incremento di temperatura dell'aria [°C]
80	70	30	20
Coefficiente tipico di scambio termico in condensazione [kW/m ² °C]		potenza termica scambiata [kW]	Superficie di scambio termico [m ²]
0,04		562	402
Portata d'acqua di refrigerazione nel condensatore [kg/s]			
13,5			

d. Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali

ENEA svolge azioni di supporto tecnico-scientifico ai Ministeri per la definizione di un quadro nazionale di riferimento, che guidi gli operatori coinvolti nel settore del solare termodinamico, in linea con quanto previsto dalla Strategia Energetica Nazionale, che individua questa tecnologia come una delle più promettenti per sviluppi industriali nel medio termine.

ENEA partecipa inoltre alle collaborazioni in corso nel settore, sia a livello europeo che internazionale, essenziali per indirizzare le attività di ricerca, stabilire sinergie con i principali attori non nazionali e acquisire risorse nell'ambito dei progetti europei. In particolare, tale partecipazione riguarda i gruppi di lavoro dell'European Energy Research Alliance (EERA), l'Implementing Agreement dell'IEA SolarPACES e la European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA).

Per quanto riguarda il supporto ai Ministeri, nell'aprile 2013, nell'ambito degli eventi legati alla Fiera di Hannover, l'ENEA ha partecipato, su invito del Consolato Generale d'Italia, ad una giornata di studio sul tema Energia, Trasporti e Sostenibilità organizzata dallo stesso Consolato e dalla Metropol Region di Hannover (Germania). La manifestazione, volta a promuovere le relazioni tecnico-economiche tra Italia e Germania nei settori energia, trasporti e logistica sostenibili, ha offerto l'occasione di presentare le migliori tecnologie e iniziative italiane.

L'ENEA ha presentato la tecnologia del solare termico a concentrazione a sali fusi che riscuote notevole interesse in Germania non tanto per le applicazioni in loco ma per la presenza di aziende tedesche che operano nel settore esportando componenti e sistemi.

Nell'ambito delle collaborazioni internazionali, l'ENEA, partecipa come rappresentante italiano all'interno del SolarPACES un Implementing Agreement dell'International Energy Agency.

Il SolarPACES ha lo scopo di favorire il contatto fra ricercatori operanti nella R&S sui sistemi solari termodinamici, Opera tramite un Comitato Esecutivo (ExCo) che si riunisce due volte l'anno e tramite gruppi di lavoro afferenti a 6 Task specifici (Impianti, Chimica Solare, Tecnologia dei componenti, Calore di processo, Risorse solari, Dissalazione solare). Organizza inoltre annualmente la Conferenza internazionale più prestigiosa nel campo della R&S nel settore solare termodinamico /chimica solare.

L'attività dell'Italia, che ha aderito a SolarPACES nel 2009, nel 2013 ha comportato:

- la partecipazione al meeting del Task I (Impianti solari) in relazione al Gruppo di Lavoro sul progetto guiSmo (realizzazione di una guideline sulla modellistica delle prestazioni) e a un nuovo gruppo di lavoro dedicato alla valorizzazione della dispacciabilità per la rete elettrica della produzione con impianti solari termodinamici; il meeting si è svolto a Las Vegas (USA), nel settembre 2013; in assenza di studi nazionali in merito è comunque stata presentata una breve nota sull'impatto della generazione fotovoltaica sulla rete italiana;
- la partecipazione alla conferenza SolarPACES 2013, che si è svolta a settembre 2013 a Las Vegas (USA). Nel corso della conferenza è stato presentato un contributo tecnico sulla simulazione di impianti a sali fusi; un poster sulle attività italiane nel settore del Solare Termodinamico; un esponente ENEA ha fatto parte del Comitato scientifico e ha presieduto come Chairman a una sessione sui ricevitori solari. Sono state effettuate due visite tecniche ad impianti solari nella zona circostante Las Vegas: l'impianto di Ivanpah (BrightSource) con tre torri da 130 MW l'una a vapore diretto surriscaldato e all'impianto di Tonopah (Solar Reserve) con una torre a sali fusi da 110 MW.
- La partecipazione, come rappresentante italiano, al meeting del comitato esecutivo (ExCo) che si è svolto sempre a Las Vegas (USA), settembre 2013. Durante il meeting sono state presentate brevemente le ultime novità in campo italiano, in particolare in circuito sperimentale a sali fusi di ASE-Chyoda a Massa Martana.
- ENEA inoltre partecipa alle attività dei Task II-chimica solare e Task III-guidelines su misure ottiche per specchi e collettori.

Sintesi della situazione riscontrata

A livello internazionale la tecnologia solare termodinamica vive una situazione che presenta luci e ombre. Positiva infatti la realizzazione di nuovi grandi impianti in USA (oltre a quelli oggetto di visita, sono in costruzione altri impianti a collettori parabolici lineari per centinaia di MW), la presenza sul lato della R&S del programma SunShot del Department of Energy (peraltro da più parti indicato come troppo ambizioso riguardo al target di 6 cent/kWh a breve termine) e il forte impulso in Cina e Sud Africa; quest'ultimo Paese ha messo in cantiere mezza dozzina di impianti da 50-100 MW l'uno nell'arco di due anni, e inizia a dare anche un contributo scientifico non indifferente. La Cina si presenta, invece, come uno fra i "player" più accreditati per impianti di tecnologia relativamente consolidata, ed era infatti presente soprattutto negli stand commerciali.

Negativa la situazione in Spagna; le recenti disposizioni legislative spagnole, che hanno imposto una drastica riduzione retroattiva di incentivi già decisi, su impianti da poco realizzati, ha portato al blocco totale delle nuove attività e forte stress su molte aziende (alcune dovranno chiudere o ridimensionarsi fortemente). Il totale degli impianti rimane quindi per ora stazionario a circa 2000 MW.

In generale, la partecipazione di delegati è stata inferiore alle recenti conferenze, in gran misura a causa della fortissima riduzione spagnola; inspiegabilmente anche il profilo USA è risultato molto basso, sia a livello plenario che in sede di comitato esecutivo (nessun americano ha relazionato). Degno di interesse però il contributo in sede di Task I (sul valore del solare termodinamico per la rete) degli studi dell'NREL.

Oltre a essersi riscontrata una partecipazione italiana più ridotta rispetto al recente passato, perdura l'incertezza sui programmi realizzativi italiani; allo stesso tempo varie aziende estere stanno iniziando ad accreditarsi per l'impiego di sali fusi nei sistemi parabolici o Fresnel lineari:

- l'americana Skyfuel, che ha presentato una memoria e sta realizzando un proprio circuito di prova per sistemi parabolici;
- la francese AREVA, la cui filiale USA sta realizzando un circuito di prova per Fresnel lineari, al Sandia;
- il consorzio tedesco Schott-Flabeg, che propone il proprio collettore più recente (Ultimate Trough) per l'impiego a sali fusi e ha dichiarato di avere un impianto da 100.000 m² in fase di sviluppo in Italia (il costruttore sarebbe a quanto pare una società altoatesina).
- altri circuiti sperimentali sono stati realizzati da Abengoa (USA); non vi sono notizie certe sui circuiti di ACS-Cobra e Siemens (Evora).

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Alcune delle attività descritte nel precedente capitolo sono state svolte in collaborazione con le strutture universitarie riportate nel seguito.

Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali, Ambiente (DICMA)

“Studio e modellazione di un mezzo di accumulo termico a calore latente a bassa ed alta temperatura basato sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase” (Obiettivo b, linea b.3)

I temi sviluppati nell'ambito accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente hanno riguardato lo studio di sistemi innovativi di accumulo termico per impianti solari termodinamici che utilizzano come mezzo di accumulo a calore latente un materiale a cambiamento di fase.

È stata studiata la possibilità di impiegare miscele ternarie di sali con possibili aggiunte di carbonati che siano in grado di operare a medio-basse ed alte temperature e sviluppato un metodo tipo Hot-Wire per la determinazione della conducibilità termica dei PCM e valutarne la dipendenza dalla temperatura.

Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

“Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a media temperatura costituito da una miscela di sali e nanoparticelle” (Obiettivo b, linea b.3)

L'accordo di collaborazione con l'Università di Perugia ha riguardato lo studio di soluzioni tecnologiche in grado di condurre a sistemi di accumulo termico per impianti solari termodinamici più compatti utilizzanti, come mezzo di accumulo a calore latente, dei PCM. In particolare è stata studiata la possibilità di incrementare la capacità di accumulo e la diffusività termica dei PCM esistenti attraverso l'aggiunta di piccole quantità di opportune nanoparticelle

Le attività hanno previsto la realizzazione e la caratterizzazione di nuovi materiali a cambiamento di fase nano-caricati attraverso la selezione e caratterizzazione dei PCM di base e delle nanoparticelle da aggiungere agli stessi, nonché lo studio e sviluppo di metodi di miscelamento PCM-nanoparticelle in grado di assicurare la distribuzione ottimale dei singoli componenti.

Università degli Studi di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria

“Studio e progettazione preliminare di impianti di cogenerazione innovativi di piccola taglia alimentati da sistemi di accumulo termico a sali fusi di impianti solari a concentrazione” (Obiettivo c, linea c.2)

Nell'ambito dell'accordo tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma Sapienza è stata condotta un'indagine sulla fattibilità di differenti soluzioni per l'utilizzazione energetica del calore dei sali fusi, alla luce della disponibilità merceologica di macchine utilizzabili nella taglia compresa fra 15 e 100 kWe. Questa analisi ha orientato la scelta nell'ambito delle macchine a vapore, per le criticità emerse legate all'impiego di motori di diverso tipo nell'applicazione considerata.

E' stato effettuato il dimensionamento di massima di un impianto basato sull'impiego di due turbine a vapore, di taglie pari a 100 e 15 kWe.

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

La ricerca in ambito italiano nel campo dell'energia dal mare è attiva da circa dieci anni con progetti mirati allo sviluppo di dispositivi atti a funzionare nel Mar Mediterraneo in particolare e in zone oceaniche in genere. Molti dei sistemi in fase di studio in Italia hanno raggiunto maturità scientifica e possono passare alla fase di sviluppo e commercializzazione. Tale fase al momento è demandata agli spin-off universitari nati nel corso dell'attività di ricerca, sebbene l'attenzione e l'interesse da parte degli investitori siano crescenti nel tempo lasciando prevedere interessanti possibilità per il futuro.

L'idea di convertire in energia elettrica l'energia associata al moto ondoso, alle correnti di marea non è recente, e nel tempo sono stati sviluppati diversi progetti finalizzati alla realizzazione di dispositivi per la generazione di energia elettrica dal mare. Diversi sistemi sono attualmente in attività ed hanno dimostrato di poter essere operativi anche in difficili condizioni operative, come mareggiate oceaniche.

È da notare comunque che lo sfruttamento dell'energia dal mare è attualmente ad uno stadio meno avanzato rispetto a quello di altre risorse rinnovabili quali il vento o il sole, anche perché presenta un grado di complessità operativa più rilevante. Tuttavia, si affaccia ad una disponibilità, sia in termini di densità di potenza che di spazi decisamente di rilievo, di grande interesse per un Paese come l'Italia, con forte sviluppo costiero e limitate disponibilità di altre fonti energetiche. Sistemi di produzione di energia dal mare possono essere particolarmente interessanti anche per le numerose isole presenti in Italia, in molte delle quali l'approvvigionamento energetico, realizzato comunemente da centrali termoelettriche a gasolio, risulta oneroso dal punto di vista economico e di non trascurabile impatto ambientale. Inoltre, lo sviluppo dei sistemi di assorbimento e conversione energetica di tipo costiero, sia di tipo galleggiante che a barriere sommerse poggiate su bassi fondali, può avere una valenza significativa, per la riduzione dei fenomeni di erosione costiera.

La ricerca nel settore marino presenta diverse attività che possono essere suddivise in sei grandi categorie: caratterizzazione della risorsa, dispositivi e tecnologie, varo e operatività, impatto ambientale, infrastrutture di ricerca e formazione ed infine impatto socio-economico.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della risorsa bisogna intanto ricordare che l'energia può essere estratta dal mare attraverso tecnologie che utilizzano l'acqua di mare come forza motrice o che sfruttano il suo potenziale chimico o termico. In particolare possono essere individuate le seguenti fonti: onde, correnti di marea, correnti marine, gradienti di temperatura e salinità. Ognuna di queste fonti di energia richiede una specifica tecnologia per la conversione in energia elettrica. Numerosi progetti di ricerca sono stati indirizzati soprattutto alla conversione di energia dalle onde e dalle correnti di marea e taluni hanno ormai raggiunto la fase di prototipo dimostrativo.

Il Mediterraneo è un bacino semichiuso e come tale è caratterizzato da una circolazione marina con associati gradienti di temperatura ed escursioni di marea sensibilmente più deboli rispetto a quelli oceanici. Queste caratteristiche limitano le fonti energetiche disponibili nel Mediterraneo alle correnti di marea e alle onde. Al fine di valutare correttamente l'opportunità di installare dispositivi di conversione ondosa o corrente di marea sono necessari due livelli di dettaglio:

- mappatura/previsione della densità di potenza media del moto ondoso/corrente, su larga scala (ad esempio per tutte le coste del Mar Mediterraneo) per poter identificare le possibili aree d'azione;
- mappatura delle caratteristiche del moto ondoso/corrente nel singolo sito di installazione, per poter progettare e collocare il singolo dispositivo/impianto, valutando anche la produttività del sistema.

L'attività di ricerca del presente progetto è indirizzata allo sviluppo di un sistema operativo per la previsione dell'energia associata al moto ondoso, alla realizzazione di una campagna di misure nello Stretto di Messina, e all'ottimizzazione e progettazione di due dispositivi di conversione del moto ondoso.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il Progetto comprende sia attività di nuova impostazione sia attività a prosecuzione di quelle condotte nel precedente PAR 2012 (progetto 2.1.8 "Studi e valutazioni del potenziale energetico delle correnti marine").

Nel corso della precedente annualità sono state svolte attività di modellistica volte alla produzione di mappe climatologiche di energia dal moto ondoso. Sono state in particolare realizzate mappe climatologiche per l'intero bacino Mediterraneo alla risoluzione di $1/16^\circ$ e climatologie, alla risoluzione di $1/120^\circ$ per le aree a maggior energia. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando come forzante atmosferico i campi di vento provenienti dalle analisi fornite dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF). L'attività svolta nel corso di questa annualità è stata rivolta invece alla creazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso su tutto il Mediterraneo ad una risoluzione di 3,5 km e per alcune aree di particolare interesse alla risoluzione di circa 800 m. Il modello più idoneo alla simulazione per l'intero bacino è il codice WAM, mentre per le simulazioni a più alta risoluzione è utilizzato il codice SWAN. Quest'ultimo è infatti più idoneo alla simulazione del moto ondoso in acque poco profonde, includendo i fenomeni fisici di dissipazione dell'energia caratteristici delle acque basse. È stato inoltre analizzato in dettaglio il potenziale energetico ed i livelli ondosi estremi lungo le coste del Mediterraneo, a partire da 31 punti per ciascuno dei quali vengono analizzate serie temporali di 10 anni dei livelli di altezza significativa, periodi di picco e direzioni di propagazione. I livelli estremi sono fondamentali sia per il dimensionamento dei dispositivi, sia per garantire il funzionamento dell'impianto in condizioni di sicurezza.

Nel corso del progetto sono stati analizzati i dispositivi di conversione del moto ondoso del tipo a colonna d'acqua oscillante (*Oscillating Water Column OWC*), facendo particolare riferimento ai REWEC3 (*REsonant Wave Energy Converter-Realization 3*), noti anche come U-OWC. Dopo avere fornito un inquadramento generale del dispositivo, ed avere illustrato il modello matematico utilizzato per l'idrodinamica dei REWEC3, si è proceduto all'ottimizzazione di un dispositivo da collocarsi nella costa nord occidentale della Sardegna e nel porto di Genova. Allo scopo di migliorare le prestazioni dei convertitori U-OWC è stato implementato un modello matematico di tipo CFD per la riproduzione dell'idrodinamica. Il modello sarà utilizzato in seguito per la realizzazione di esperimenti ad hoc per verificare soluzioni costruttive alternative a quelle attualmente considerate. Si è progettato inoltre l'allestimento di un impianto sperimentale di tipo U-OWC presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, che sarà utilizzato, congiuntamente ad ENEA, per ulteriori ricerche sull'ottimizzazione di tali dispositivi.

L'attività di ricerca si è concentrata anche sulla progettazione in scala reale di un dispositivo di conversione di tipo *point absorber* di potenza 60 kW. Il dispositivo considerato è ISWEC. Nel precedente PAR il dispositivo era stato descritto invece nella sua forma prototipale. Il dimensionamento preliminare del dispositivo in scala reale è stato basato su semplici considerazioni energetiche. A partire dai valori approssimati, tutte le parti del sistema (scafo, gruppo giroscopico, e generatore elettrico) sono state ottimizzate per raggiungere il miglior compromesso tra costi di realizzazione e prestazioni del dispositivo.

Il progetto si è infine concentrato sul tema dell'energia da correnti di maree. In particolare è stata condotta una campagna di misure volta a misurare l'andamento delle correnti nello Stretto di Messina nell'area relativa al punto di massima energia. Si sottolinea che l'area è stata individuata grazie ai dati prodotti dalla simulazione numerica sviluppato nella precedente annualità. I dati campionati nel corso della campagna di misura sono stati successivamente utilizzati per la validazione del modello numerico sviluppato in precedenza.

Le attività di ricerca del progetto sono state suddivise in quattro obiettivi. Il primo obiettivo (a) ha riguardato lo sviluppo di un sistema operativo per la previsione dello stato del mare e dell'energia ad esso associato. L'attività di ricerca che si riferisce all'obiettivo b è stata indirizzata allo studio dei dispositivi di tipo OWC (*Oscillating Water Column*) in generale, e ai convertitori del tipo U-OWC in particolare. L'obiettivo c ha riguardato una campagna di misura delle velocità di marea nelle vicinanze del punto più energetico dello Stretto di Messina. Infine l'obiettivo d è stato focalizzato allo studio di un convertitore di tipo *point absorber* e alla sua progettazione in scala reale.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo di modelli meteo-marini

L'attività svolta ha come scopo il supporto modellistico ambientale all'applicazione di tecnologie innovative nel campo dell'energia ricavabile dal moto ondoso. Nel corso della precedente annualità sono state effettuate attività di modellistica volte alla produzione di mappe climatologiche di energia dal moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo. La costa occidentale della Sardegna e quella nord-occidentale della Sicilia sono state individuate come le regioni dei mari italiani più interessanti dal punto di vista del possibile sfruttamento energetico. Sono quindi state realizzate mappe climatologiche a più alta risoluzione per queste due zone.

L'attività di questa annualità è stata invece rivolta alla previsione del moto ondoso. Mentre, infatti, i dati climatologici sono indispensabili alla scelta dei siti idonei all'installazione di dispositivi di conversione di energia; la

conoscenza in anticipo delle condizioni del mare è fondamentale sia nella fase di installazione sia in quella di gestione dei dispositivi.

Il prodotto della seguente attività è un sistema operativo di tipo rilocabile multi-nesting (annidato) in grado di fornire in maniera regolare le previsioni dello stato del mare e dell'energia ad esso associato su tutto il bacino del Mediterraneo ad una risoluzione di circa 3-4 km, e per le aree di interesse fino a 800 m di risoluzione. All'interno delle aree di interesse un ulteriore livello di nesting consente di fornire la previsione nelle immediate vicinanze della costa (poche decine di metri). Particolare attenzione è stata rivolta allo sviluppo di siti web e web-gis dedicati alla presentazione e diffusione dei dati delle previsioni.

a.1 Sviluppo e verifica di modelli meteo-marini per la simulazione del moto ondoso per aree portuali italiane di interesse

L'attività svolta in questo sotto-obiettivo è stata dedicata alla creazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia del moto ondoso, per alcune aree dei mari italiani di particolare interesse, ad una risoluzione spaziale che raggiunge all'incirca i 700-800 m [rapporto RdS/2013/229]. Come mostrato nel corso del precedente anno, uno dei modelli numerici particolarmente idonei alla simulazione del moto ondoso nelle aree costiere è SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Questo modello è infatti capace di simulare il moto ondoso anche in acque poco profonde, in quanto considera nella sua formulazione i fenomeni fisici di dissipazione dell'energia caratteristici delle acque basse.

La scelta delle aree è stata effettuata tenendo conto delle mappe climatologiche delle onde ricavate in precedenza. Due aree più estese sono state definite nella zona ovest della Sardegna e nell'area della Sicilia nord-occidentale, caratterizzate dai valori più elevati di energia. Inoltre sono state incluse le aree su cui è in corso l'installazione di impianti di produzione di energia dal moto ondoso (Civitavecchia). Alcune aree sono state individuate in corrispondenza di isole, per le quali l'autosufficienza energetica può risultare fondamentale. Inoltre sono state definite due zone in aree portuali, dove in futuro è possibile prevedere l'installazione di sistemi di conversione del moto ondoso (Golfo di Genova e di La Spezia-Carrara). Un'ultima area significativa è stata ritenuta quella del Golfo di Napoli, non solo per le caratteristiche portuali ma anche per la possibilità in futuro di effettuare una validazione accurata dei risultati delle simulazioni utilizzando i dati misurati da radar disponibili su quell'area.

Il sistema per la previsione del moto ondoso richiede in input campi del vento prodotti da un modello meteorologico girato in modalità operativa. Come forzanti superficiali sono stati utilizzati i dati provenienti dal sistema SKIRON, operativo presso l'Università di Atene, disponibili sull'intera area Mediterranea alla risoluzione di 0,05° x 0,05°. Le previsioni coprono un intervallo temporale di 5 giorni, i campi in uscita hanno frequenza oraria. Queste previsioni si basano su un modello meteorologico non idrostatico in coordinate Eta ampiamente validato, in uso presso circa venti istituti di ricerca e meteorologici nel mondo.

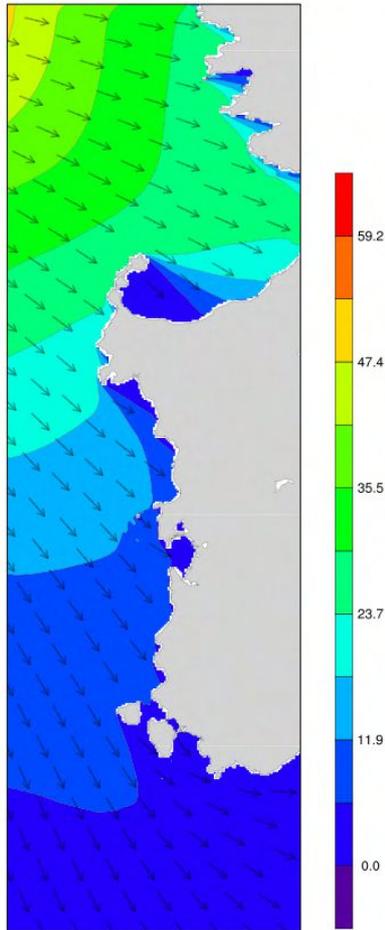
Come descritto nella subtask a.2, è stata realizzata una catena di modelli di onde a partire dalla simulazione relativa all'intero bacino Mediterraneo fino all'alta risoluzione nelle zone di interesse. L'intera catena di modelli di onde viene eseguita automaticamente ogni mattina sulla macchina di calcolo acquisita nel corso del progetto; i campi meteorologici sono disponibili verso le ore 3 del mattino, entro le ore 8 ha termine l'elaborazione. Le mappe con i dati caratteristici delle onde e l'energia associata sono resi pubblici sul sito web dell'ENEA alla risoluzione temporale di un'ora, sia per tutto il Mediterraneo che per tutti i 10 sotto-bacini, i cui limiti geografici sono riportati in Tabella 55. Esempi delle mappe prodotte sono mostrati nelle Figure 213-215.

Tabella 55. Coordinate degli estremi delle aree ad alta risoluzione

Indice area	Nome area	Latitudine minima	Latitudine massima	Longitudine minima	Longitudine massima
C01	Sardegna occidentale	38,2	42,2	7,75	9,
C02	isola di Pantelleria	36,5125	37,0125	11,75	12,25
C03	isola di Lampedusa	35,2	35,7	12,3125	12,8125
C04	Sicilia nord-occidentale	37,41875	38,2	11,875	12,875
C05	Civitavecchia	41,79375	42,29375	11,5	12,0
C06	Golfo La Spezia/Carrara	43,7625	44,26250	9,75	10,25
C07	Isola d'Elba	42,5125	43,0125	10,	10,5
C08	Golfo di Napoli	40,48125	40,98125	13,75	14,5
C09	Golfo di Genova	44,0125	44,5125	8,5	9,5
C10	Isola di Gorgona	43,1375	43,6375	9,625	10,125

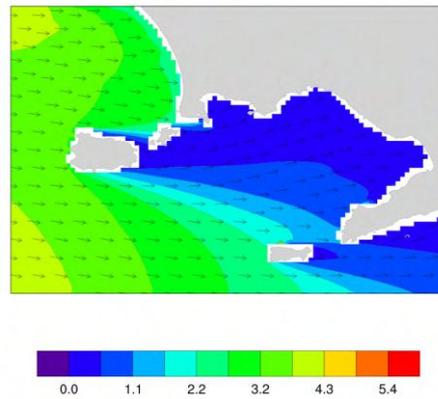
Forecast valid for 13:00 GMT 17 Sep 2013

Wave Energy
Init 00:00 GMT 13 Sep 2013 KW/m



Forecast valid for 13:00 GMT 17 Sep 2013

Wave Energy
Init 00:00 GMT 13 Sep 2013 KW/m



Forecast valid for 13:00 GMT 17 Sep 2013

Wave Energy
Init 00:00 GMT 13 Sep 2013 KW/m

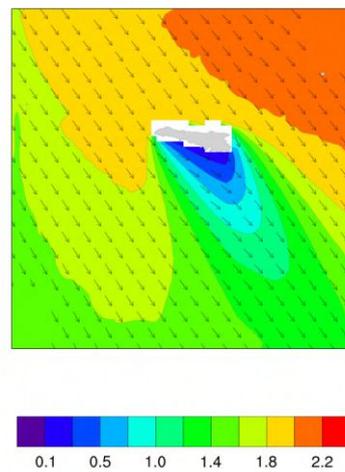


Figura 213. Esempio di previsione del valore dell'energia e della direzione per la costa occidentale della Sardegna, Golfo di Napoli, e Lampedusa

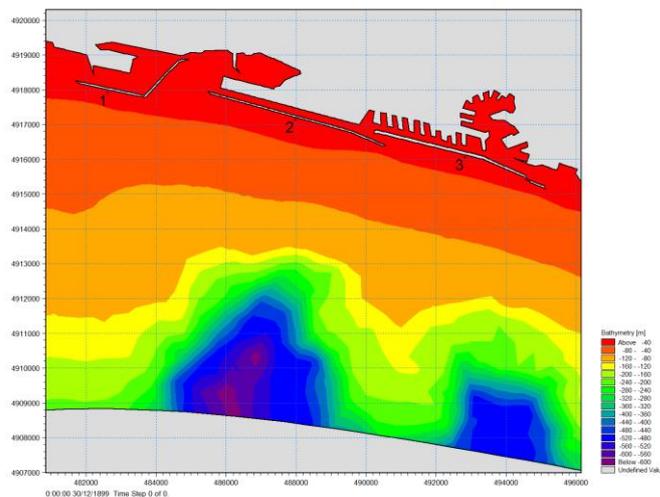


Figura 214. Batimetria e linea di costa utilizzata per l'area del porto di Genova. Il modello utilizzato è il MIKE21

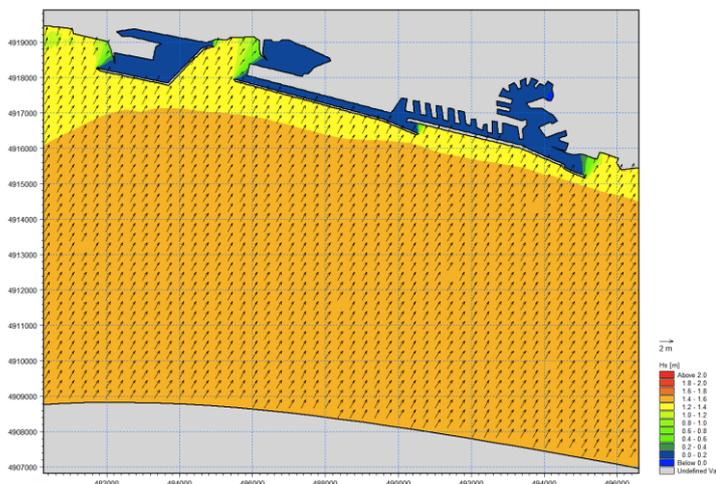


Figura 215. Esempio di previsione del valore dell'altezza significativa e della direzione per il porto di Genova (previsione valida per il giorno 17/09/2013 alle ore 00)

La collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria ha consentito di completare la catena operativa con la simulazione dei valori di onda sotto costa, effettuata tramite il modello MIKE 21 SW. Tale modello risolve le equazioni per le onde mediante il metodo dei volumi finiti su griglie non strutturate permettendo un'accurata descrizione dei fenomeni di propagazione delle onde in acque basse. A titolo di esempio viene mostrata un'applicazione relativa al Golfo di Genova in cui i valori di altezza e direzione delle onde ricavati in maniera operativa dal modello SWAN vengono propagati fino a costa. Nelle Figure 214-215 sono riportate mappe planimetriche della batimetria utilizzata e dell'altezza d'onda prevista in un'area che include il porto di Genova, dove si mostra l'elevata risoluzione raggiungibile.

Oltre alla visualizzazione delle singole mappe statiche sono state messe a punto metodologie GIS finalizzate alla gestione dei dati territoriali, all'elaborazione di analisi spaziali (geoprocessing) ed alla rappresentazione di mappe tematiche. I dati geospaziali di base e le mappe elaborate sono archiviati e gestiti in un apposito repository: essi possono essere visualizzati ed interrogati mediante applicativi di tipo desktop GIS o tramite l'applicazione WebGIS appositamente sviluppata. Quest'ultima costituisce l'interfaccia geografica di alcuni dei principali risultati prodotti nel progetto, rendendoli fruibili in maniera open e accessibili on-line (Figura 216).

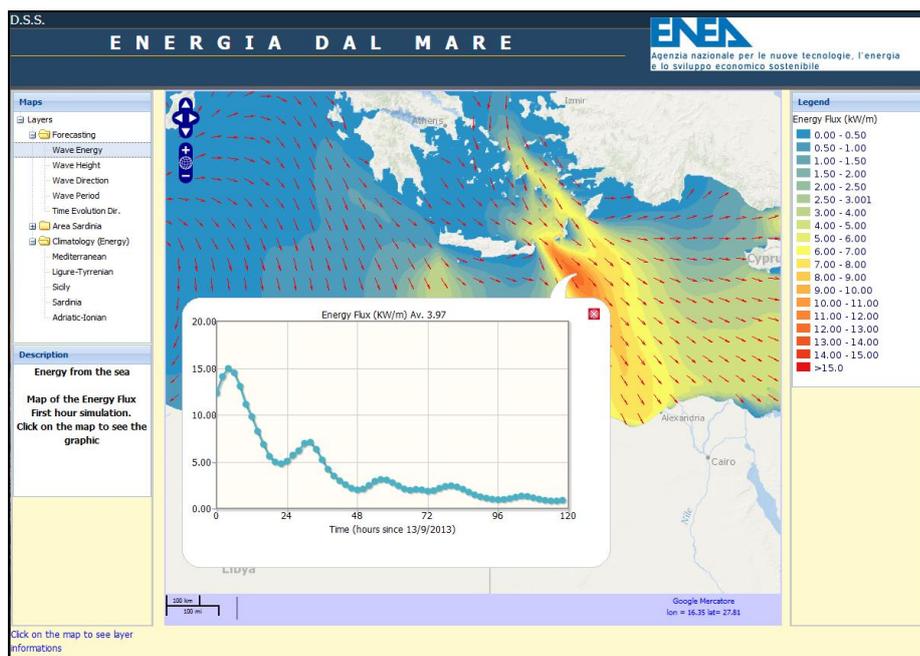


Figura 216. Mappa tematica delle previsioni del moto ondoso e relativo grafico orario consultabile via web-gis

a.2 Sviluppo di un sistema per la previsione del moto ondoso a scala di bacino mediterraneo

L'attività svolta ha come scopo il supporto modellistico all'applicazione di tecnologie innovative nel campo dell'energia ricavabile dal moto ondoso [rapporto RdS/2013/085]. Nel corso del PAR 2011 sono state effettuate attività di modellistica volte alla produzione di mappe climatologiche di energia dal moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo. La costa occidentale della Sardegna e quella nord-occidentale della Sicilia sono state individuate come le regioni dei mari italiani più interessanti dal punto di vista del possibile sfruttamento energetico. Sono quindi state realizzate mappe climatologiche a più alta risoluzione per queste due zone. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando come forzante atmosferico i campi di vento provenienti dalle analisi fornite dal Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF) che costituiscono un dataset omogeneo per un arco temporale di dieci anni.

L'attività svolta nel presente obiettivo è stata invece rivolta alla previsione del moto ondoso, indispensabile per la prescrizione delle condizioni al contorno necessarie ai modelli ad alta risoluzione del subtask a.1. Mentre, infatti, i dati climatologici sono indispensabili alla scelta dei siti idonei all'installazione di dispositivi di conversione di energia, è necessaria la conoscenza in anticipo delle condizioni del mare nella fase di gestione dei dispositivi. Essa consente di valutare in anticipo la quantità di energia prodotta dal singolo dispositivo e quindi quella immessa nella rete elettrica; inoltre, taluni dei dispositivi di conversione, possono sfruttare al meglio il moto ondoso tramite la riconfigurazione di alcuni parametri di esercizio quando si dispone in anticipo di informazioni dettagliate sulle caratteristiche spettrali delle onde.

E' stato quindi realizzato un sistema operativo per la previsione del moto ondoso, messo a punto per l'intera area Mediterranea ad una risoluzione di $1/32^\circ$ (corrispondente circa a 3,5 km). Questo sistema si basa sull'uso del codice WAM, utilizzato presso i maggiori centri di ricerca e di previsione di moto ondoso, che risulta adatto alle condizioni di acque profonde. Nella definizione dei parametri della simulazione vengono definiti anche gli estremi geografici delle griglie per le quali vengono memorizzate le condizioni al contorno per simulazioni ad alta risoluzione. La possibilità quindi di gestire direttamente la simulazione relativa all'intero bacino Mediterraneo risulta fondamentale per la realizzazione di successive analisi su specifiche zone di interesse.

Il sistema per la previsione del moto ondoso richiede in input campi del vento prodotti da un modello meteorologico girato in modalità operativa; tali dati devono essere disponibili in modo continuativo e affidabile, è fondamentale la disponibilità in tempi ragionevolmente brevi dopo la loro produzione. Poiché si intende raggiungere una risoluzione elevata è opportuno che anche i forzanti atmosferici utilizzati siano ad elevata risoluzione, questa caratteristica è fondamentale nel bacino Mediterraneo, caratterizzato da una topografia complessa, per la corretta valutazione del vento nelle zone costiere. Le previsioni meteorologiche che soddisfano questi requisiti, attualmente disponibili sull'area Mediterranea, sono costituite dal sistema SKIRON sviluppato dall'*Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group* dell'Università di Atene e dalle previsioni fornite dal Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA). Entrambi i sistemi forniscono dati utilizzati da numerosi centri di ricerca e di previsione nel mondo.

Il sistema operativo del CNMCA si basa sull'uso del modello non idrostatico COSMO utilizzato alla risoluzione orizzontale di $1/16^\circ$ sull'intera area Mediterranea. Il modello ha 40 livelli verticali fino a circa 22 km di altezza, fornisce previsioni per i 3 giorni successivi con uscite disponibili con frequenza tri-oraria. Il modello SKIRON si basa sul modello meteorologico ad area limitata in coordinate Eta operativo ad $1/20^\circ$, effettua previsioni meteorologiche per 5 giorni e i campi prodotti sono distribuiti con frequenza oraria.

Poiché le previsioni meteorologiche a breve termine dipendono significativamente dalle condizioni iniziali, nei centri meteorologici operativi una intensa attività viene dedicata alla determinazione dello stato iniziale tramite l'assimilazione dati. Questa tecnica utilizza un elevato numero di osservazioni di diversa origine, sia osservazioni sinottiche convenzionali (TEMP, PILOT, SYNOP, SHIP, BUOY) che osservazioni ottenute da Wind-Profiler o da strumentazione a bordo di aerei e satelliti. I sistemi operativi presso l'Università di Atene e presso il CNMCA utilizzano implementazioni differenti della tecnica variazionale di assimilazione 3DVAR.

Per la realizzazione della catena operativa di previsione del moto ondoso si è deciso di utilizzare i dati provenienti dal sistema SKIRON, sia in considerazione della più elevata frequenza temporale dei dati disponibili che della possibilità di effettuare simulazioni che coprono un maggiore intervallo temporale.

E' stata effettuata, preliminarmente all'utilizzo in modalità operativa, una verifica dei risultati ottenuti forzando il modello WAM del Mediterraneo con i campi di vento del sistema SKIRON e con i campi delle analisi prodotte dall'ECMWF. Gli andamenti di altezza significativa, periodo medio, periodo di picco e direzione, relativamente ad una simulazione della lunghezza di un mese, sono stati confrontati anche con le boe disponibili della Rete Ondametrica Nazionale. Le due simulazioni risultano molto simili e concordano bene con i dati osservati come si può notare ad esempio nella Figura 217, relativa alla boa di Alghero.

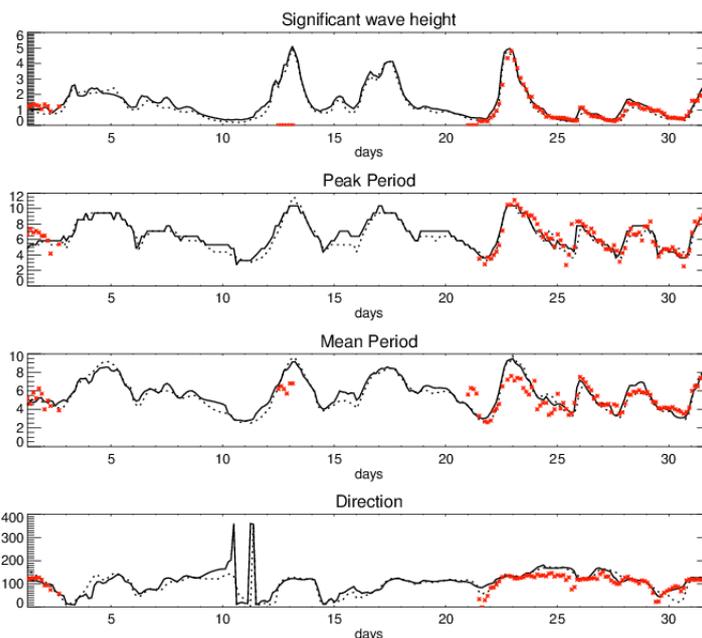


Figura 217. Andamento temporale relativo al mese di gennaio 2008 di altezza significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione in corrispondenza della boa di Alghero. La linea continua è relativa a una simulazione con il codice WAM forzato con i campi ECMWF, la riga tratteggiata d una simulazione forzata con i campi di vento ricavati dalla previsione con il sistema SKIRON, in rosso i dati della boa

Per verificare l’impatto della scelta come forzante atmosferico del modello SKIRON rispetto al modello COSMO del CNMCA, sono stati confrontati i campi di vento prodotti per alcuni tempi successivi. In Figura 218 è mostrato il confronto relativo ad una previsione a 24 ore con i due sistemi; le caratteristiche generali del campo sono comuni alle due simulazioni ma mostrano comunque alcune significative differenze. Il campo di vento prodotto dal modello COSMO risulta in generale più frastagliato, con valori massimi leggermente più elevati. Si può osservare in generale che, anche se la risoluzione del modello COSMO (1/16°) è leggermente inferiore a quella del modello SKIRON (1/20°), il primo presenta in maniera più evidente effetti locali dovuti all’interazione con la topografia. Questa caratteristica si può osservare in varie zone, ad esempio nella parte del mare Ionio a ridosso della costa calabra, nell’alto Adriatico e a sud di Creta.

Le differenze nei campi di vento hanno suggerito di estendere il confronto, verificando l’effetto sui campi di altezza significativa delle onde, simulati tramite il modello WAM alla risoluzione di 1/16° utilizzando i due diversi forzanti atmosferici. Il modello WAM in parte riduce le differenze osservate nei campi di vento, tuttavia si nota una zona più estesa di onde di intensità elevata generate dai venti provenienti dalla

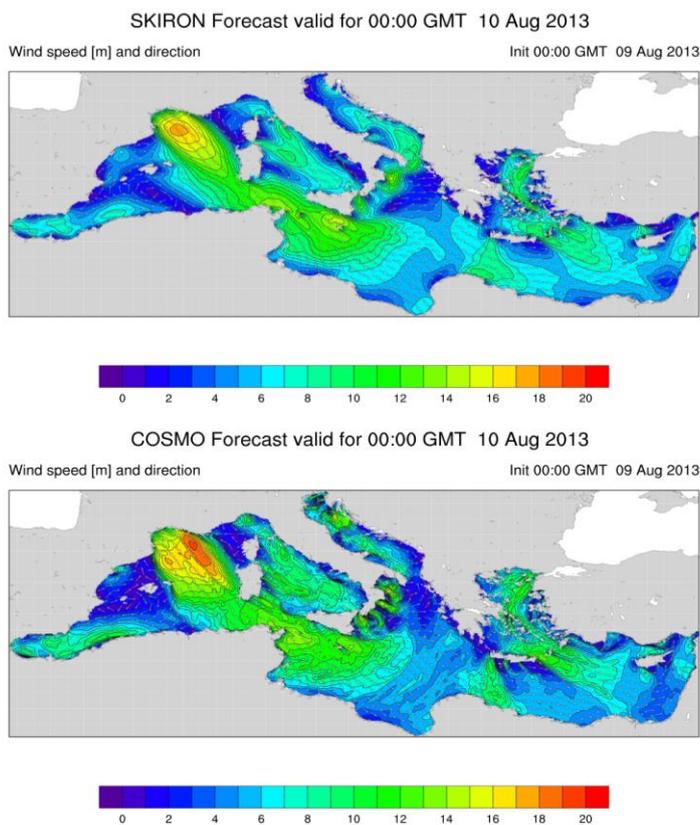


Figura 218. Previsioni relative al campo di vento a 10 m per le ore 12 del 9 agosto 2013. Pannello superiore campo ricavato dal sistema SKIRON, pannello inferiore dal modello COSMO

valle del Rodano, nel caso in cui la simulazione sia stata forzata con i dati del modello COSMO. Sono anche evidenti gli effetti a scala locale dei diversi venti costieri (Figura 219).

Per effettuare una valutazione relativa all'utilizzo di forzanti atmosferici a diverse risoluzioni, sono state effettuate due simulazioni dell'intero bacino Mediterraneo forzate rispettivamente con i dati provenienti dal sistema operativo SKIRON a due diverse risoluzioni spaziali di 0.1° e 0.05°. Le simulazioni sono state realizzate con il modello WAM alla risoluzione di 1/16°. Il confronto effettuato calcolando la *root mean square* per ogni tempo come somma dei quadrati delle differenze tra le due simulazioni, per ogni punto della griglia del modello WAM, ha mostrato una differenza estremamente limitata tra le due simulazioni. Il valore medio della differenza risulta sempre negativo, indicando che l'utilizzo di forzanti a più alta risoluzione genera valori di onde sistematicamente maggiori, anche se la differenza di intensità è limitata.

Analogamente il confronto tra due simulazioni a diverse risoluzioni del modello WAM (1/16° e 1/32°), utilizzando come forzante i campi del vento a 10 m forniti dal sistema SKIRON alla risoluzione di 0,05° mostra una *root mean square* che aumenta con il passare del tempo. Il valore della differenza media, comunque molto basso, non ha un segno definito indicando quindi che esistono alternative valori maggiori ora per l'una ora per l'altra simulazione.

La Figura 220 mostra un esempio di mappa di energia per il bacino Mediterraneo prodotta dalla catena operativa di previsione del moto ondoso.

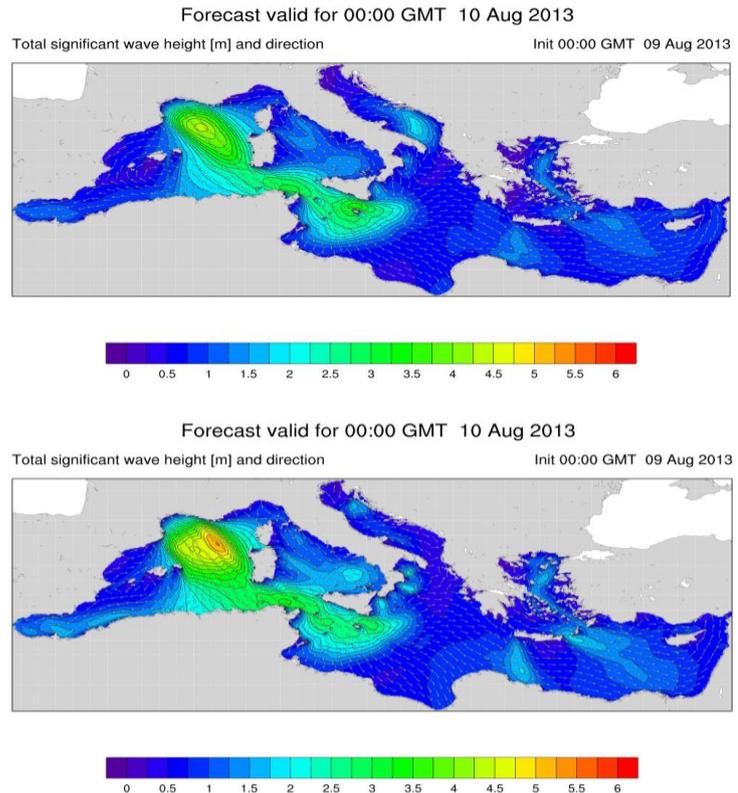


Figura 219. Previsione ottenuta con il modello WAM alla risoluzione di 1/16° per il giorno 10 agosto alle 00. Nel pannello superiore previsione utilizzando i dati del vento SKIRON, nel pannello inferiore i dati del modello COSMO

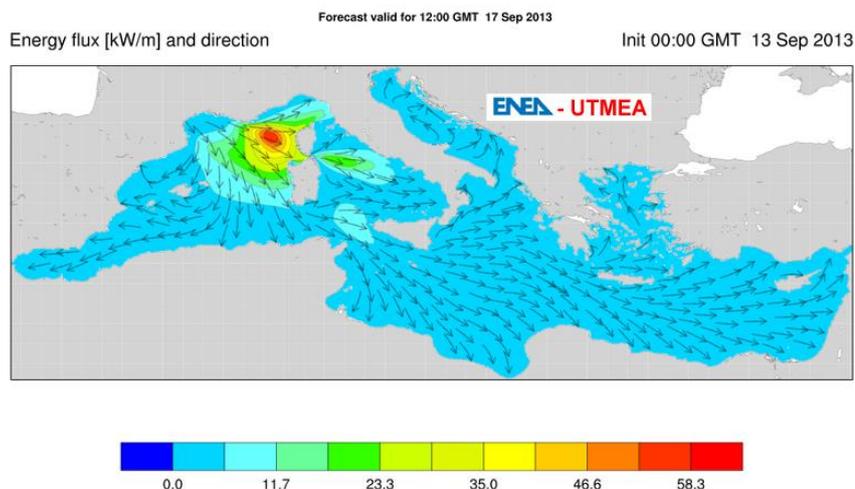


Figura 220. Esempio di previsione del valore dell'energia e della direzione per l'intero Mediterraneo

b. Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali

Nel presente obiettivo si è fatto riferimento ad uno specifico impianto per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica appartenente alla famiglia degli OWC (Oscillating Water Column), denominato U-OWC. Gli OWC sono dispositivi muniti di una camera di assorbimento con imboccatura posta al di sotto del livello di medio mare,

che contiene nella parte inferiore acqua e nella parte superiore aria, la quale è posta in collegamento con l'atmosfera mediante un condotto in cui è alloggiata una turbina, generalmente di tipo Wells. Gli U-OWC, rispetto ai tradizionali OWC, constano di un addizionale condotto verticale nella porzione lato mare, che è posto in collegamento con la camera di assorbimento. Sotto l'azione delle onde incidenti s'instaura un moto dell'acqua all'interno del sistema condotto verticale/camera di assorbimento, che genera una compressione e decompressione dell'aria nella sacca all'interno della camera e, quindi, un flusso nel condotto capace di azionare la turbina.

L'introduzione del condotto verticale nell'U-OWC, sebbene non rappresenti una considerevole modifica strutturale rispetto alla geometria dei tradizionali sistemi OWC, determina sostanziali cambiamenti nell'idro-dinamica dell'impianto. Tali da garantire ad un U-OWC coefficienti di assorbimento superiori a quelli di un OWC per qualsiasi condizione ondosa. Questo perché un U-OWC, grazie all'introduzione del condotto verticale, può essere progettato al fine di raggiungere la condizione di risonanza per i livelli di agitazione ondosa incidente che convogliano la maggiore quantità di energia durante l'anno. Nei tradizionali OWC, invece, il realizzarsi delle condizioni di risonanza richiede l'attuazione di sistemi tecnologicamente complessi per il controllo di fase di ogni singola onda, capaci di determinare una risonanza forzata del sistema. Inoltre, i sistemi U-OWC possono essere incorporati in tradizionali dighe portuali a parete verticale che assolvano la funzione classica di protezione del bacino portuale, ed al contempo consentano la produzione di energia elettrica dall'energia ondosa incidente.

Lo studio dei sistemi U-OWC è stato già oggetto delle analisi effettuate nella precedente annualità [rapporto RdS/2012/231], durante la quale si era effettuato uno studio per il dimensionamento di massima di impianti U-OWC per le tre località di Genova, Pantelleria e Porto Pischera.

Nel presente progetto è stata, invece, condotta un'analisi puntuale e dettagliata per il dimensionamento ottimizzato di un impianto U-OWC in funzione dello stato del mare. E' stato inoltre realizzato un modello numerico di tipo CFD del convertitore da validare in seguito attraverso test sperimentali da eseguire su un modello in scala installato in mare. Il modello è in fase di allestimento presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

b.1 Approfondimento delle caratteristiche dei sistemi U-OWC (Oscillating Water Column) e dei power take-off a loro applicabili

In questo lavoro si affronta lo studio e l'analisi della tecnologia dei sistemi OWC, con l'obiettivo di approfondire alcuni aspetti critici, tra cui il dimensionamento ottimale dei dispositivi, le frequenze di funzionamento e l'accoppiamento ottimale tra cavità e dispositivo elettromeccanico per la conversione del flusso oscillante in energia elettrica da immettere in rete [rapporto RdS/2013/086].

Il punto di partenza per l'analisi è costituito dalle caratteristiche fisiche del moto ondoso, che condizionano il funzionamento dei dispositivi per il recupero di energia.

Il potenziale energetico da moto ondoso disponibile in Italia è caratterizzato da un'ampia diffusione, per il notevole sviluppo costiero del nostro Paese, ma da dimensioni tipiche di onde minori rispetto ai Paesi che si affacciano sugli oceani e ciò rende necessario lo sviluppo di dispositivi ottimizzati per operare in modo soddisfacente in tali condizioni.

Sono stati proposti molti tipi di dispositivi per il recupero di energia dalle onde, di cui solo alcuni sono stati sperimentati in condizioni reali e hanno dato risultati soddisfacenti e vengono classificati secondo diversi criteri. Tra questi i più interessanti per la situazione italiana sono quelli da installare sulla costa, il più possibile perpendicolarmente al fronte d'onda e basati sul principio fisico della colonna d'acqua oscillante, denominati OWC.

I dispositivi OWC sono essenzialmente dei cassoni di calcestruzzo armato, del tipo utilizzato per le opere portuali e per la difesa delle coste dall'erosione, la cui cavità interna è riempita solo parzialmente di acqua ed è in contatto con il mare nella parte inferiore. Per effetto del moto ondoso, l'acqua nella cavità oscilla verticalmente e sottopone il cuscinetto d'aria nella parte superiore a cicli di compressione e di decompressione; attraverso un condotto verso l'esterno si crea quindi un flusso d'aria pulsante che può azionare particolari tipi di turbine per la produzione di energia elettrica (Figura 221).

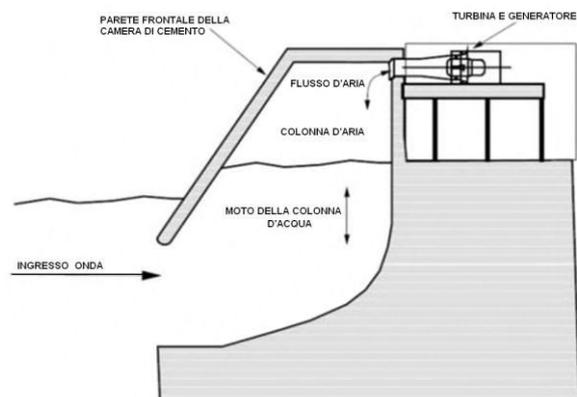


Figura 221. Principio di funzionamento dei dispositivi OWC

Le problematiche di progettazione dei dispositivi OWC riguardano da una parte gli aspetti strutturali, relativi alla necessità di resistere a sollecitazioni notevoli in caso di mareggiate e di operare in ambiente aggressivo per la salsedine e incrostante per la presenza di materiali solidi e organismi marini. Dall'altra riguardano gli aspetti funzionali, in particolare la frequenza di funzionamento per il trasferimento ottimale di energia dal mare alla turbina.

I principali impianti OWC dimostrativi proposti nel mondo sono: Osprey, Limpet e Limpet 500 nel Regno Unito; Mutriku in Spagna, Douro e Pico in Portogallo; Toftestallen in Norvegia; OE Buoy in Irlanda; Sakata, Kujukuri, Sanze e Mighty Whale in Giappone; Vizhinjam in India; Dawanshan e Shanwei in Cina e Kembla in Australia.

Tra i dispositivi per la conversione dell'energia (power take-off) applicabili agli OWC ci sono le turbine convenzionali, che però richiedono sistemi di valvole per rendere costante la direzione del flusso d'aria, e le turbine autorettificanti, tra cui la turbina Wells, la turbina ad azione, la turbina Denniss-Auld, e il rotore Savonius. Ci sono diversi studi sul funzionamento di queste macchine, ma ancora non si è individuata la soluzione ottimale e prosegue lo sviluppo di nuovi tipi.

In Italia è in fase di sviluppo da parte dell'Università di Reggio Calabria e del suo spin-off "Wavenergy.it S.r.l." un dispositivo denominato U-OWC, brevettato col nome REWEC3, che rappresenta l'evoluzione dei sistemi a colonna d'acqua oscillante. Il principale aspetto innovativo riguarda la sezione ad "U", da cui il nome, che consente di accoppiare in modo più efficace le frequenze tipiche del moto ondoso con la frequenza propria della cavità, rispetto ai dispositivi OWC già esistenti. Il vantaggio è particolarmente elevato per le condizioni meteo-climatiche del Mediterraneo e lo sviluppo del dispositivo potrà preludere a diffuse applicazioni in Italia e nei paesi limitrofi.

Presso il Laboratorio marittimo dell'Università di Reggio Calabria è in corso di costruzione un apparato sperimentale in scala 1:10 per lo svolgimento delle prove per ottimizzare il dispositivo. Tali prove potranno essere svolte in collaborazione con l'ENEA che potrà occuparsi del calcolo fluidodinamico in 3D con il modello numerico già sviluppato in questa fase e di cui si riferisce nel rapporto RdS/2013/230.

L'apparato sperimentale in fase di realizzazione sarà costituito da un basamento in calcestruzzo armato e da un cassone in acciaio appositamente strumentato e collegato al sistema di acquisizione dati del laboratorio. Verrà infatti installato nelle acque dello Stretto di Messina di fronte al laboratorio (Figura 222).



Figura 222. Basamento dell'apparato U-OWC sperimentale in corso di realizzazione presso il Laboratorio marittimo dell'Università di Reggio Calabria

Un prototipo a piena scala è in corso di costruzione da parte della società Wavenergy.it S.r.l. nella nuova darsena di Civitavecchia. Avrà un fronte di 650 metri, una potenza nominale installata di circa 3,2 MW e potrà produrre circa 4 GWh/anno.



Figura 223. Dispositivo U-OWC in costruzione nella nuova darsena di Civitavecchia

b.2 Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare

Lo studio è stato elaborato a partire dai dati di moto ondoso nel Mar Mediterraneo, forniti dal modello di onde WAM (WAve prediction Model, WAMDI-Group 1988) sviluppato dall'ENEA. Il WAM è un modello di onda di terza generazione, e nello specifico è stata adottata una risoluzione spaziale di $1/32^\circ$, corrispondente a circa 3-4 km.

I dati ENEA sono stati elaborati per 31 punti dislocati lungo le coste del Mar Mediterraneo. Nello specifico, sono stati considerati punti nel Nord Africa, lungo le coste asiatiche sul Mediterraneo, in Turchia e lungo le coste europee che si affacciano sul Mediterraneo.

Le analisi hanno riguardato due aspetti fondamentali per la progettazione di dispositivi per lo sfruttamento dell'energia ondosa posti in mare: *i)* le analisi di eventi estremi; *ii)* le analisi di clima ondoso in una fissata località. Le prime sono di interesse per la progettazione strutturale e la stabilità globale dei diversi possibili dispositivi di sfruttamento, le seconde sono fondamentali per le stime di potenziale energetico in un'assegnata località e, quindi, per l'ottimizzazione degli impianti per la conversione dell'energia ondosa incidente.

Analisi simili sono state condotte nella precedente annualità [rapporto RdS/2012/231], allora le elaborazioni erano state limitate a tre sole località poste lungo il perimetro costiero Italiano. Si trattava di punti in prossimità delle località di Genova, Pantelleria e Porto Pischera. Le indagini sono state in seguito estese a un numero considerevole di punti al fine di ottenere una mappatura sia di potenziale energetico che di eventi estremi all'interno dell'intero perimetro costiero del Mare Mediterraneo.

Al fine di esaminare il potenziale energetico ed il clima ondoso lungo le coste del Mare Mediterraneo, si sono identificati 31 punti lungo l'intero perimetro costiero, incluse le principali isole. Per i singoli punti si è proceduto quindi all'analisi dei livelli di altezza significativa omnidirezionale (a prescindere, cioè, dalla direzione di propagazione delle onde) e delle storie temporali delle mareggiate. L'analisi delle mareggiate consente di determinare la mareggiata triangolare equivalente associata a ciascuna mareggiata vera. Viene poi determinato il periodo di ritorno delle mareggiate estreme in ciascun paraggio.

I passaggi fondamentali di calcolo hanno riguardato la stima della probabilità $P(H_s > h)$ che l'altezza significativa H_s sia maggiore di una fissata soglia h in una certa località, che è stata elaborata considerando una distribuzione di tipo Weibull a due parametri: il parametro u di forma adimensionale, e w che è un fattore di scala, espresso in metri se H_s è in metri.

$$P(H_s > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right]$$

In termini probabilistici, maggiore è w , maggiori saranno i valori di altezza significativa nella località fissata (a parità di u). Per tutti i 31 punti sono stati ricavati i parametri u e w . Sono state, quindi, ricavate per le diverse località i valori di altezza significativa media, altezza critica e altezza significativa massima.

Per le medesime 31 località è stata effettuata l'analisi delle mareggiate estreme, mediante il modello delle Mareggiate Triangolari Equivalenti (MTE) che ad ogni mareggiata reale associa una mareggiata triangolare, di fissata altezza a (pari all'altezza significativa massima della mareggiata reale) e base b (rappresentativa della durata della mareggiata, calcolata affinché l'altezza dell'onda massima attesa nella mareggiata triangolare sia pari a quella della mareggiata reale). Per tutte le 31 località analizzate, sono stati ricavati i valori dei parametri a_{10} e b_{10} che rappresentano, rispettivamente, l'altezza media e la base media di un insieme di $N=100$ (10 volte il numero di anni di osservazione) mareggiate triangolari equivalenti e, quindi, la legge di regressione basi-altezze $\bar{b}(a)$ nell'assegnata località.

Mediante il modello delle MTE è stato possibile stimare il periodo di ritorno $R(H_s > h)$ di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima supera la soglia h e la persistenza media $D_m(h)$ al di sopra della soglia h . Tali grandezze sono state analizzate per tutti i 31 punti. Sono state, quindi, fornite tabelle in cui venivano riportati i valori dell'altezza significativa $h(R)$ per fissati valori del periodo di ritorno $R(1, 10, 100 \text{ anni})$ e relativa persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$.

È stato, quindi, possibile valutare il flusso di energia ondosa nei punti in esame che ha consentito di determinare il potenziale energetico lungo le coste del Mare Mediterraneo.

Si è trovato che i 3 punti più significativi dal punto di vista energetico nel bacino del Mediterraneo sono: il punto 30 (costa nord-occidentale della Sardegna, Italia), il punto 25 (Francia) ed il punto 28 (ad ovest della Corsica, Francia) (Figura 224 per la localizzazione dei punti).



Figura 224. Localizzazione dei punti analizzati caratterizzati dal maggiore contenuto energetico nel Mediterraneo

Per tali punti si riportano di seguito i risultati delle elaborazioni precedentemente descritte (Tabelle 56-58). Si tratta di un'estrapolazione dei risultati globali derivati per tutti i 31 punti e riportati nel rapporto RdS/2013/137.

Tabella 56. Altezza significativa media, altezza critica, altezza significativa massima, parametri u e w della distribuzione omnidirezionale dell'altezza significativa $P(H_s > h)$, parametri caratteristici a_{10} e b_{10} K_1 e K_2 della regressione base altezze

Point	$h_s \text{ media}(m)$	$h_s \text{ crit}(m)$	$h_s \text{ max}(m)$	u	$w(m)$	$a_{10}(m)$	$b_{10}(h)$	K_1	K_2
30	1,40	2,10	10,27	1,18	1,50	6,14	97,10	1,031	0,04
25	1,39	2,08	8,69	1,55	2,02	5,34	114,63	0,637	0,43
28	1,25	1,88	7,93	1,20	0,74	5,55	96,41	0,959	0,001

Tabella 57. Valori dell'altezza significativa $h(R)$ per fissati valori del periodo di ritorno $R(1, 10, 100 \text{ anni})$ e relativa persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$

Point	$h(R=1 \text{ year})[m]$	$D_m(h)$	$h(R=10 \text{ years})[m]$	$D_m(h)$	$h(R=100 \text{ years})[m]$	$D_m(h)$
30	7,5	12,0	9,9	9,1	12,1	7,3
25	6,9	11,3	8,5	9,6	9,9	8,6
28	3,6	10,2	4,8	7,6	5,8	6,1

Tabella 58. Valori indicativi del flusso di energia totale, del flusso di energia medio annuo e della potenza per i punti 30, 25 e 28

P	$\Phi_{tot}(W/m)$	$\Phi_{medio \text{ annuo}}(W/m)$	$P(KW/m)$
30	3,4E+08	3,4E+07	11,7
25	3,0E+08	3,0E+07	10,34
28	2,6E+08	2,6E+07	8,9

Infine, per i 3 punti caratterizzati dai valori maggiori di potenziale energetico nel bacino del Mediterraneo (punti 30, 25 e 28), sono state fatte delle elaborazioni direzionali sia della probabilità di superamento dell'altezza significativa $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ (considerando una distribuzione data dalla differenza di due probabilità di tipo Weibull a due parametri) che del periodo di ritorno $R(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima eccede la soglia h , con direzione delle onde compresa in un prefissato settore (θ_1, θ_2) . Sono stati stimati per le tre località i parametri w_α e w_β [m] della $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$ che dipendono dal settore considerato (θ_1, θ_2) , e che consentono di identificare i settori di traversia principale e secondario. Di seguito (Tabella 59 e Figura 225) si riportano, a titolo di esempio, alcuni risultati delle analisi direzionali effettuate per il punto 30.

Tabella 59. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22.5° per il punto 30: si riportano il settore di traversia principale centrato su 135° caratterizzato dal massimo valore del parametro w_α e quello di traversia secondario centrato su $112,5^\circ$

Settore centrato su	θ_{min}	θ_{max}	$w_\alpha(m)$	$w_\beta(m)$
112.5°	101°	123°	1.18	1.111
135°	123°	146°	1.524	1.311

E' stata quindi condotta un'analisi puntuale e dettagliata per il dimensionamento ottimizzato di un impianto U-OWC incorporato in una diga portuale per la località caratterizzata dal maggiore valore di potenziale energetico nel Mare Mediterraneo. Si tratta del punto 30 localizzato lungo la costa Nord-Ovest della Sardegna. Si è considerato il punto di coordinate geografiche $40,7625^\circ N$ $8,00^\circ E$, a profondità di circa 250 m rispetto al livello medio del mare. Il clima ondoso in tale punto è stato trasposto, mediante il modello MIKE21, in corrispondenza di un punto antistante Capo dell'Argentiera posto su profondità intermedia (30 m s.l.m.m.), in cui il moto ondoso non risente dell'effetto del frangimento. Nella località in esame non è attualmente presente una struttura portuale, ma è pensabile per le configurazioni della batimetria e della costa, ipotizzarne un'eventuale realizzazione.

Sicuramente l'area in esame è di grande interesse per effettuare una possibile stima di produzione di impianto U-OWC in quanto è quella caratterizzata dal maggiore valore di energia ondosa in tutto il bacino del Mar Mediterraneo.

A partire dai dati di largo del modello WAM e dalla batimetria è stato possibile definire mappe del coefficiente di shoaling-rifrazione per tutti i possibili stati di mare ivi presenti e dunque è stato possibile stimare la serie storica trionfaria delle componenti ondose di mare vivo e di swell sottocosta per tutti i punti compresi nella griglia di calcolo. E' stato possibile ricavare la frequenza di apparizione delle onde per classi di altezza significativa e periodo medio, come mostrato nelle Tabelle 60 e 61, rispettivamente per le componenti ondose di swell e di wind-waves.

Lo studio disaccoppiato dei livelli di agitazione ondosa delle onde di vento e delle onde di tipo swell, è di particolare interesse per un impianto di U-OWC, in quanto è stato dimostrato da evidenze sperimentali su un modello in scala ridotta testato presso il laboratorio NOEL di Ingegneria marittima dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, come la nuova tipologia di assorbitore è capace di raggiungere degli elevati valori del coefficiente di assorbimento soprattutto sotto l'azione delle onde di tipo swell.

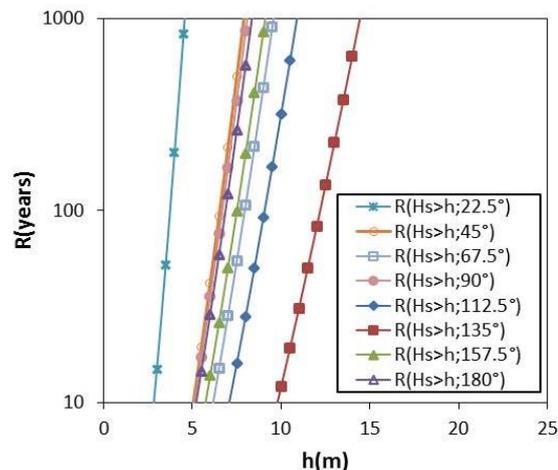


Figura 225. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5° per il punto 30

Tabella 60. Frequenze di accadimento di stati di mare rappresentativi di onde generate dal vento

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.																
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0 - 1	10.9873	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	36.0473	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	20.2434	0.06514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	5.44395	7.518	0.06856	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0.79191	2.63284	4.55605	0.11313	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	0.06171	0.16798	1.46383	2.98594	0.35653	0.01714	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0.00343	0.024	0.0857	0.45938	1.6421	0.56565	0.0857	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 - 8	0	0	0.00343	0.02057	0.11999	0.7782	0.80905	0.19541	0.01371	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0	0	0	0.00343	0.024	0.09256	0.47309	0.32568	0.14398	0.03428	0	0	0	0	0	0
9 - 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03428	0.14741	0.16455	0.06514	0.02743	0.01028	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00686	0.024	0.04114	0.03085	0.00686	0.01028
11 - 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00343	0
12 - 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 - 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 - 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	73.58	10.41	6.18	3.58	2.12	1.38	0.99	0.67	0.37	0.29	0.20	0.07	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01

Tabella 61. Frequenze di accadimento di stati di mare rappresentativi di onde di mare lungo

Tm [s]	Hs [m] sottocosta - punto a profondità 30m s.l.m.m.																
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	0.01714	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	6.77408	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	14.772	0.34967	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	11.5324	6.75351	0.14056	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	2.2386	12.5643	2.36887	0.0857	0.00343	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	0.28454	4.67947	7.62427	1.54268	0.09599	0.01371	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 - 8	0.04114	0.93589	3.75386	5.21769	1.42269	0.12341	0.03771	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8 - 9	0	0.23312	1.11759	2.31402	3.05108	1.09016	0.26397	0.03428	0.00686	0	0	0	0	0	0	0	0
9 - 10	0	0.07885	0.45595	0.69592	1.14158	1.51868	0.83648	0.26397	0.05485	0.024	0.00686	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0.04457	0.18169	0.34282	0.32568	0.41138	0.54508	0.32911	0.08913	0.03085	0.02057	0.01028	0	0	0	0	0
11 - 12	0	0	0.05485	0.16112	0.18169	0.12341	0.1577	0.1337	0.06514	0.04457	0.01714	0.00343	0.00343	0.00343	0	0	0
12 - 13	0	0	0.00343	0.01714	0.04799	0.00686	0.01028	0.024	0.024	0.00686	0.01371	0	0	0	0	0	0
13 - 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 - 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 - 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOT	35.66	25.64	15.70	10.38	6.27	3.29	1.85	0.79	0.24	0.11	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

A partire da questo tipo di analisi congiunta (onde di vento e onde di mare lungo) è stata definita una configurazione ottimizzata di U-OWC capace di massimizzare i livelli di produzione di energia elettrica nella località. Un U-OWC può essere progettato, fissando tutte le grandezze geometriche delle parti attive (condotto verticale e camera di assorbimento), per massimizzare l'efficienza energetica dell'impianto nella località considerata. La procedura di ottimizzazione dell'impianto ha portato all'identificazione delle caratteristiche geometriche dell'impianto. Il dimensionamento ottimizzato prevede un condotto verticale di larghezza pari a 2,5 m e una larghezza della camera di assorbimento di 5 m. Inoltre, si è adottata una turbina di Wells biplana.

L'energia media annuale convertita dalla singola turbina è mostrata in Figura 226. Per ciascuno stato di mare le energie convertite maggiori sono relative ai periodo di progetto e, in particolare, si evince che i maggiori contributi sono relativi alle onde di mare lungo. Globalmente l'impianto è in grado di produrre una quantità di energia media annua per chilometro di struttura di 9657 MWh/anno/km.

E' stata, infine, dimensionata la diga portuale in cui l'impianto U-OWC sarebbe incorporato. Per la stessa sono state effettuate tutte le verifiche di stabilità globale, così come descritte nel rapporto RdS/2012/231. Per la stessa sono state eseguite anche tutte le verifiche di sicurezza idraulica dell'impianto sotto l'azione delle onde estreme.

Per maggiori approfondimenti si rimanda ai rapporto RdS/2013/137 e 138.

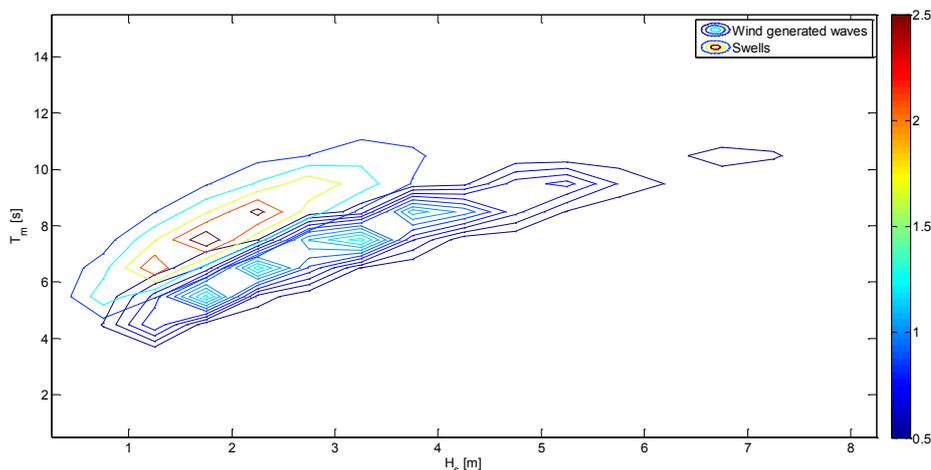


Figura 226. Energia media annuale convertita per turbina in MWh/anno

b.3 Sviluppo di modellistica fluidodinamica per l'ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione del dispositivo di power take-off applicato

E' stato sviluppato un modello per la simulazione numerica CFD (Computational Fluid Dynamics) per un dispositivo di conversione di tipo U-OWC a colonna d'acqua oscillante. Il modello ha rappresentato una tappa essenziale nel cammino dello sviluppo di nuovi dispositivi OWC. La simulazione CFD consente, infatti, di ottimizzare il dimensionamento del dispositivo con un numero limitato di prove sperimentali e quindi di ridurre notevolmente i

tempi e i costi di sviluppo, in modo da rendere economicamente sostenibile l'attività e anticipare il coinvolgimento dell'industria italiana in attività produttive, con importanti risvolti commerciali e occupazionali.

Il codice di simulazione utilizzato nel presente progetto è OpenFOAM. Questo è stato scelto perché si confronta con successo con le funzionalità dei maggiori pacchetti software CFD commerciali ed anche perché in ambito scientifico opera un'ampia comunità di utilizzatori particolarmente collaborativa. OpenFOAM è un codice di tipo *open source* concesso in licenza sotto GNU (*General Public Licence*) e prodotto dalla OpenCFD Ltd. Il codice è in grado di effettuare simulazioni termo-fluidodinamiche (CFD) di problemi reali in tre dimensioni sia per applicazioni scientifiche sia per applicazioni ingegneristiche, oltre ad altre simulazioni di meccanica del continuo.

La complessità dei fenomeni fisici, la dimensione degli apparati e le velocità dei flussi in gioco hanno reso estremamente laboriosa la realizzazione del modello computazionale. Inoltre l'enorme numero di celle computazionali ha reso necessario l'utilizzo di potenze di calcolo importanti. Per tali simulazioni è stato infatti necessario effettuare calcoli in multiprocessore, in particolare ne sono stati utilizzati 128 per ogni calcolo e per ognuno dei quali, la simulazione di soli tre cicli d'onda, ha richiesto approssimativamente una decina di giorni. Le macchine utilizzate sono state quelle appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni dell'ENEA denominato CRESCO.

Il modello numerico realizzato si basa sulla geometria della sezione di prova del dispositivo U-OWC in fase di realizzazione presso l'Università Mediterranea di Reggio Calabria, costituito da una cavità riempita in parte d'acqua e in parte d'aria e dal condotto di efflusso dell'aria (Figure 227-230).

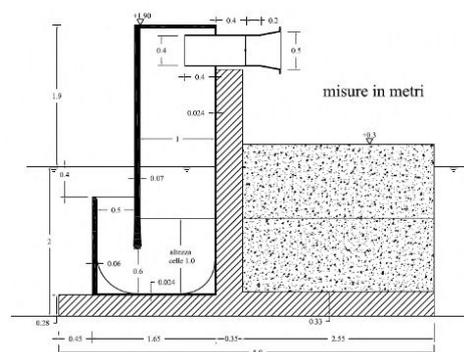


Figura 227. Schema sistema U-OWC -Università Mediterranea di Reggio Calabria

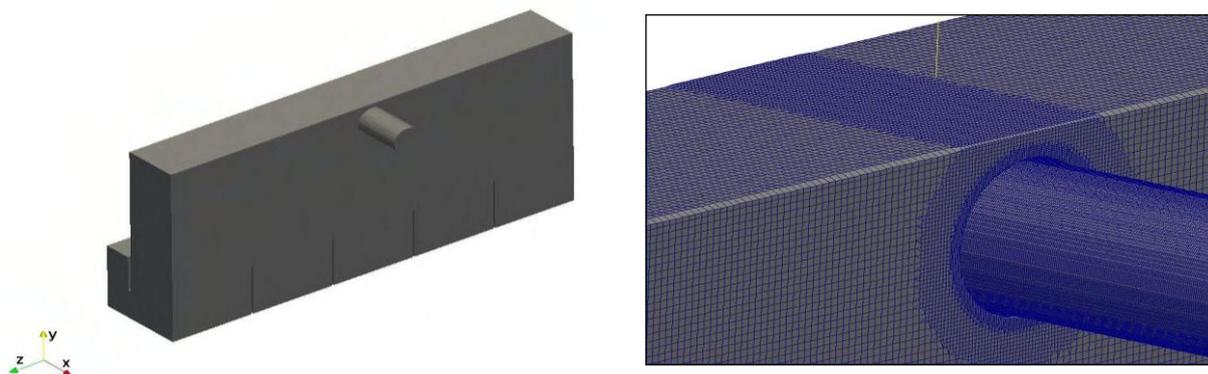


Figura 228. Geometria della cavità e del condotto e particolare di mesh (a destra)

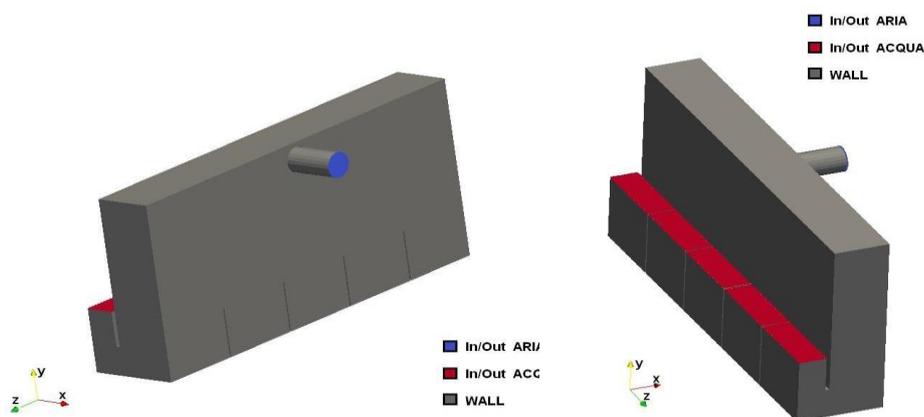


Figura 229. Modello geometrico – Condizioni al contorno

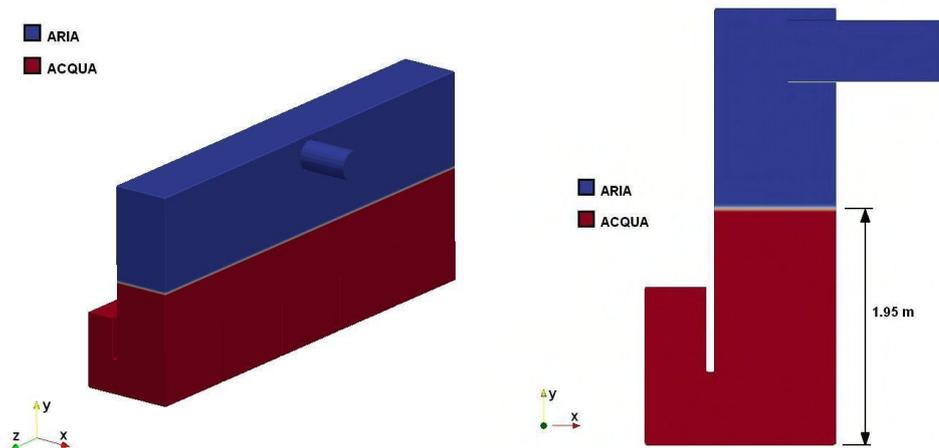


Figura 230. Modello geometrico – Livello iniziale acqua onda tipo 2, long swells

I fenomeni fisici presi in considerazione comprendono l'oscillazione della colonna d'acqua e il conseguente spostamento dell'aria per effetto del moto ondoso. Le condizioni di funzionamento analizzate considerano due situazioni: le onde prodotte dal vento locale (wind wave) e quelle prodotte dalla propagazione o smorzamento del moto ondoso (long swells). Individuati il tipo di flusso in gioco e le condizioni al contorno ed iniziali, uno degli aspetti critici è stato la realizzazione del mesh, in conseguenza della necessità di contenere il numero di elementi, e di ridurre il peso computazionale del modello, tenendo comunque adeguatamente in considerazione la necessità di limitare le dimensioni delle celle ove presente un flusso ad alta velocità.

Il mesh così realizzato è risultato costituito da un numero di elementi superiore ai quattro milioni.

I risultati ottenuti dalle due simulazioni CFD effettuate sono coerenti con quelli attesi e fanno quindi ritenere il modello in grado di descrivere in modo adeguato i fenomeni fisici in gioco (Figura 231). Per una convalida della reale validità dei risultati bisogna prevedere una successiva fase di benchmark con i risultati di prove sperimentali, che saranno disponibili a seguito del completamento delle prove sperimentali da parte dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

Per dettagli ed approfondimenti sull'attività svolta si rimanda al rapporto RdS/2013/230.

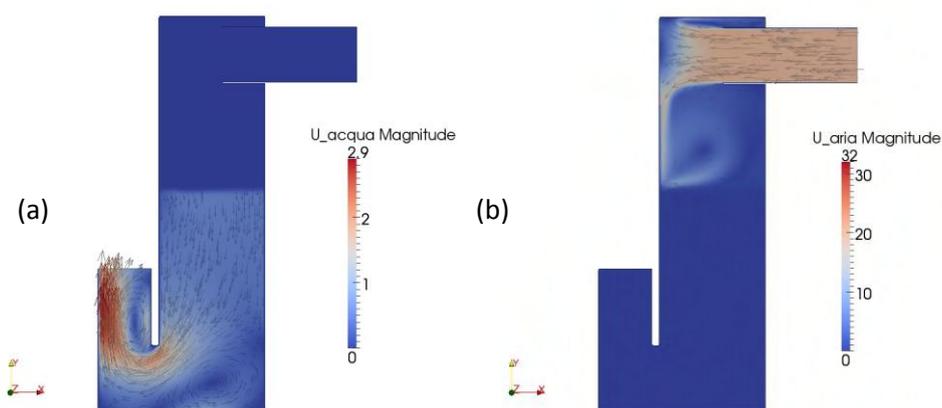


Figura 231. Andamento della velocità dell'acqua (a) e dell'aria (b) al tempo $t=6.0$ s

b.4 Progettazione di test sperimentali da realizzare su modelli in scala di dispositivi U-OWC ottimizzato per la validazione degli esperimenti numerici eseguiti

Si è proceduto alla progettazione di test sperimentali su un modello in scala di U-OWC. Un test sperimentale concernente un impianto installato in mare è in fase di allestimento presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. L'impianto sarà testato con onde di mare reali che sono degli ottimi modelli in scala sia di onde oceaniche che del Mediterraneo. La camera di assorbimento

è unica, per una lunghezza globale di 6,6 m, con un'altezza di 1,9 m sul livello di medio mare. L'affondamento dell'imboccatura è di 0,4 m. La larghezza del condotto e della camera sono rispettivamente 0,5 e 1 m. In cima alla camera di assorbimento è previsto l'alloggiamento di una turbina di Wells. Gli schemi dell'impianto e della diga portuale in cui sarà incorporato sono forniti nel rapporto completo. La loro costruzione è stata realizzata attraverso:

- il progetto "Energia dal mare", finanziato alla società Wavenergy.it s.r.l. (Spin-Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria) dal Polo di Innovazione NET Scarl, polo Energie Rinnovabili Efficienza energetica e Tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse ambientali;
- il progetto POSEIDONE (finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare) in collaborazione tra Wavenergy.it s.r.l., Faggiolati Pumps s.p.a., Università Mediterranea di Reggio Calabria e Università La Sapienza di Roma.

Nello specifico è stata progettata un'attività sperimentale in collaborazione con ENEA con costi contenuti. Allo scopo è previsto l'uso del cassone esistente al fine di determinare nuove configurazioni di utilizzo. In particolare, sarà pianificato, a valle della già descritta attività di ricerca, una rimodulazione del cassone sperimentale con cui si perverrà alla costituzione di un U-OWC (parte attiva della struttura) dalla larghezza contenuta (circa 1/3 o 1/5 della larghezza originale), che permetterà di testare le prestazioni dell'impianto con una camera di assorbimento ridotta. Il contributo scientifico di questa attività è da inquadrarsi nell'ambito dell'ottimizzazione dei cassoni REWEC3. Essa permetterà la definizione di rigorosi criteri di ottimizzazione utili in fase di progettazione. Inoltre, si segnala che ENEA sta lavorando al completamento delle prime analisi CFD del cassone. In questo contesto, i risultati sperimentali saranno di evidente utilità al fine di testare la bontà delle elaborazioni numeriche. Ai fini di una preventiva valutazione delle differenze apportate dalla partizione della camera di assorbimento, si sono ricavate le risposte dell'impianto mantenendo inalterate le caratteristiche degli stati di mare. Tutti i risultati numerici di dettaglio sono riportati nel rapporto Rds/2013/138.

c. Misure di corrente nello Stretto di Messina

Lo studio condotto ha per oggetto il rilievo sperimentale della velocità della corrente marina in uno specifico sito di misura. In particolare si è preso in esame un sito posizionato nell'area dello stretto di Messina. La scelta dell'area di installazione è connessa con i livelli locali della velocità della corrente, che lo rendono interessante per lo sviluppo delle tecnologie connesse con lo sfruttamento energetico delle correnti. Utilizzi fondamentali dei dati ricavati dalla misura delle correnti possono essere trovati nella stima della producibilità energetica nell'area di studio e la verifica di modelli numerici per la predizione del comportamento delle correnti come ad esempio quello messo a punto da ENEA.

Lo strumento utilizzato per le rilevazioni è un profilometro sonico. Tale strumento appartiene ad una classe di strumenti nota come correntometri doppler monostatici. Il termine monostatici si riferisce al fatto che lo stesso trasduttore funziona sia come trasmettitore che come ricevitore. Un rilevatore Doppler monostatico usa un set di trasduttori acustici di cui è noto esattamente il posizionamento e l'orientazione, ciascuno dei quali produce uno stretto fascio di onde sonore emesse normalmente alla superficie del trasduttore. La misura di velocità è basata sul rilievo degli spostamenti della frequenza riflessa dal particolato in sospensione in mare, lungo tre direzioni note, in modo da ricavare le tre componenti della velocità.

La tecnologia doppler per la misura della velocità delle correnti presenta alcuni significativi vantaggi: ad esempio, la misura è effettuata in un punto remoto dal sistema di misura (in tal modo la distorsione della misura indotta dalla presenza dello strumento è ridotta); è possibile effettuare misure anche a velocità relativamente basse; non sono presenti parti in movimento, come su altre tipologie di sensori (come ad esempio eliche mosse, in tal modo si riduce la sensibilità alle incrostazioni o alla formazione di colonie biologiche, e si migliora la possibilità di intervenire con applicazione di antivegetativi, circostanze particolarmente interessanti per lunghe installazioni in ambiente marino). I dati rilevati dal sensore sono rappresentati dalla velocità e dalla direzione della corrente.

Lo strumento utilizzato consente di misurare le velocità a varie profondità in celle di misura definibili dall'utente, consentendo di ricostruire il profilo di velocità in funzione della profondità, aumentando il livello di dettaglio dello studio della corrente.

In Figura 232, a titolo di esempio si riporta un tipico andamento della velocità a 10,8 m di profondità, misurato in un determinato intervallo di osservazione, nel sito di rilievo equipaggiato con il correntometro acustico. La velocità riportata è la velocità risultante nel piano orizzontale.

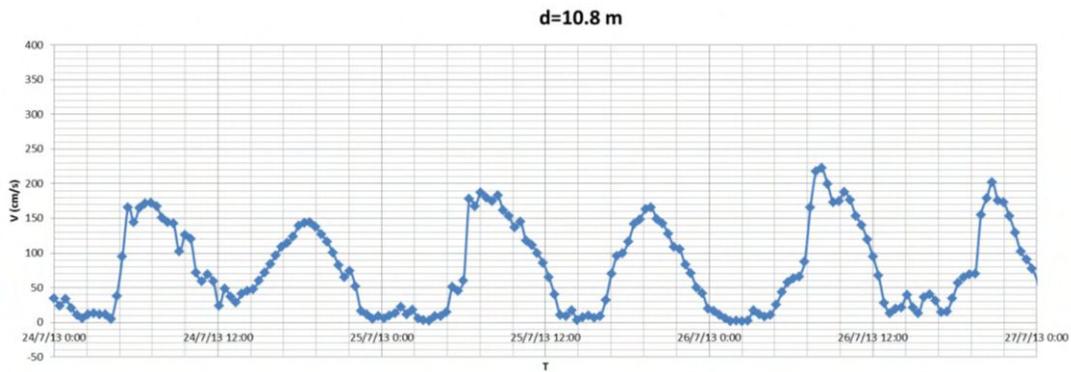


Figura 232. Velocità misurata a 10,8 m di profondità

Tecniche classiche di analisi statistica possono essere applicate alle serie temporali di velocità registrate, consentendo la stima delle distribuzioni di probabilità sperimentali del livello di velocità, utile nella previsione della producibilità energetica attesa di un eventuale sito di installazione di sistemi di conversione dell'energia delle correnti.

Per installare il correntometro è stato necessario progettare e costruire un'apposita struttura in grado di:

1. Permettere l'ancoraggio al fondo marino
2. Evitare alle cime e reti di impigliarsi nella struttura stessa
3. Permettere la regolazione dello strumento in modo che esso sia posto sempre in bolla indipendentemente dal tipo di fondale
4. Permettere un facile smontaggio del solo strumento (lasciando quindi la base ancorata al fondo) quando vanno letti i dati.

L'oggetto, realizzato in acciaio INOX AISI 316, ed è mostrato in Figura 233 pronto ad essere installato in acqua.



Figura 233. Struttura con profilatore acustico montato

Le misure acquisite durante la campagna di misura sono state utilizzate per validare il modello numerico sviluppato nel corso del PAR 2011 è [rapporto RdS/2012/171]. Il modello numerico impiegato per la simulazione è il MITgcm. Il modello è stato implementato su una griglia di calcolo orizzontale (Lon/Lat) non uniforme costituita da 300 x 840 punti. La griglia è di tipo curvilineo ortogonale e segue la linea di costa infittendosi nella zona centrale dello Stretto dove si raggiungono le massime velocità di marea. In questa regione la risoluzione della griglia raggiunge i 30 m in direzione X (longitudine) e circa 100 m in direzione Y (latitudine). In Figura 234 sono mostrate le risoluzioni spaziali della griglia computazionale nelle due direzioni (X, Y).

Il modello considera 55 livelli zeta a celle parziali sulla verticale con risoluzione costante di 7,5 m nei primi 300 m, e una risoluzione linearmente variabile fino a 180 m nella restante porzione della colonna d'acqua (1200 m). I dati batimetrici sono stati interpolati bilinearmente sulla griglia computazionale. La batimetria del modello risultante è mostrata in Figura 235. Il modello è forzato solo dalla componente barotropica di marea attraverso la specificazione delle principali componenti (M2, S2, K1, O1).

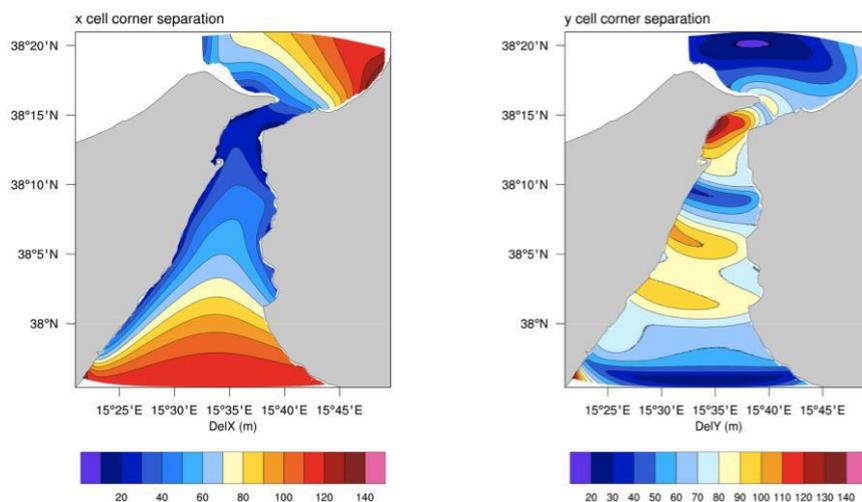


Figura 234. Risoluzione spaziale adottata per il modello MITgcm nella direzione X (sinistra) e Y (destra)

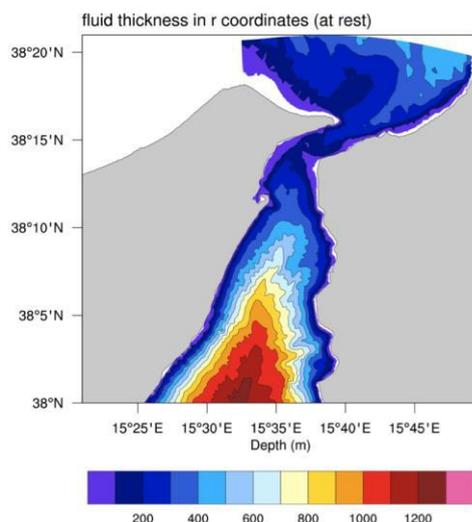


Figura 235. Batimetria del modello numerico

L'andamento temporale del modulo della velocità simulata dal modello e relativo al punto di griglia corrispondente al punto della campagna di misure è mostrato in Figura 236. Da un primo confronto qualitativo emerge che il modello è in grado di riprodurre l'andamento reale (Figura 237) con un sufficiente grado di approssimazione. I valori massimi della corrente sono in ragionevole accordo con i dati sperimentali. Tuttavia, alcune differenze sono presenti. Il modello mostra dei valori di corrente leggermente più alti rispetto ai dati sperimentali. Inoltre il modello mostra, a differenza dei dati sperimentali, un perfetto carattere semidiurno. Queste differenze sono dovute principalmente alle condizioni al contorno scelte per forzare il modello oceanografico. Il modello, infatti, è forzato solo dalla corrente barotropica di marea. Tuttavia nello Stretto di Messina agisce anche le componenti eolica e la pressione atmosferica che sono capaci di modificare localmente l'andamento delle correnti di marea e di mascherare il loro carattere semidiurno. Da questo confronto emerge quindi la necessità di introdurre il vento e la pressione atmosferica come ulteriori condizione al contorno del modello numerico.

Per approfondimenti sull'attività svolta si rimanda ai rapporti RdS/2013/087 e 228.

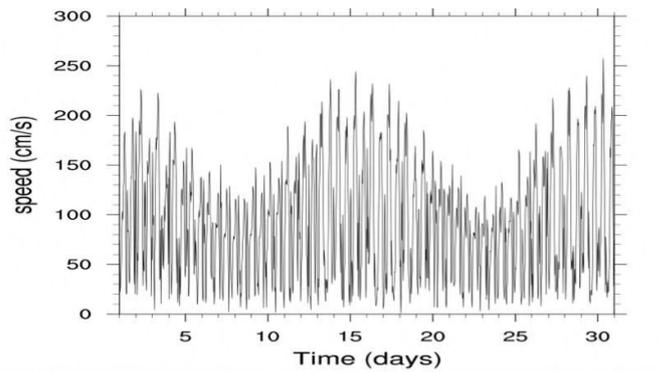


Figura 236. Velocità nel piano orizzontale della corrente di marea simulata dal modello numerico MITgcm durante un ciclo completo di marea. L'andamento temporale si riferisce al punto di griglia più vicino al punto considerato per la campagna di misure e a una profondità di 7 m

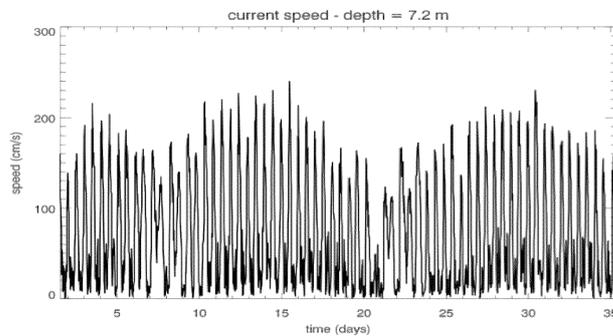


Figura 237. Velocità nel piano orizzontale e direzione della corrente nel sito di installazione a 7,2 m di profondità

d. Studi per la progettazione di un sistema point absorber in scala reale da 60 kW

Il progetto del sistema ISWEC in scala reale con taglia di potenza 60 kW, è stato sviluppato a partire dai dati di onda acquisiti per il sito di Pantelleria (Figura 238). La procedura di progetto inizia con la scelta di una condizione "tipo", detta "onda di progetto", per ricavare un primo dimensionamento di massima del sistema. Questa corrisponde alle condizioni di mare con maggior contenuto energetico su base annua per il sito di installazione. Ciò corrisponde a dimensionare il sistema per funzionare in modo ottimale proprio nelle condizioni di mare caratterizzate da un'elevata energia annua.

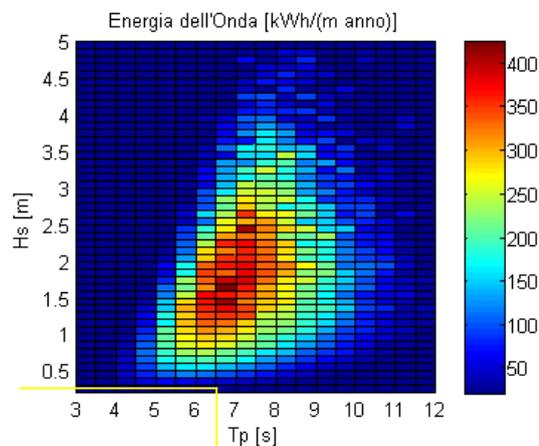


Figura 238. Distribuzione dell'energia del moto ondoso su base annua, ottenuta dalle misurazioni dell'ondametro installato a Pantelleria e identificazione del punto di progetto

Il dimensionamento preliminare del dispositivo si basa su semplici considerazioni energetiche ed ha come obiettivo la definizione di massima dei parametri fisici che caratterizzano il comportamento del sistema: dimensioni dello scafo, taglia del generatore elettrico, momento angolare del giroscopio.

A partire da questi valori di primo tentativo, tutte le parti del sistema sono state ottimizzate per raggiungere il miglior compromesso tra costi di realizzazione e prestazioni del dispositivo. Per raggiungere questo obiettivo è stato sviluppato un algoritmo di ottimizzazione delle prestazioni che agisce sui parametri di controllo del sistema, per identificare le condizioni ottimali di funzionamento in corrispondenza di tutti i diversi stati di mare che si vengono a realizzare. Allo stesso tempo vengono identificate anche le condizioni di moto ondoso dove non è conveniente mantenere l'operatività del sistema (potenza in ingresso eccessiva o troppo ridotta). Tale algoritmo tiene conto dei limiti fisici caratteristici degli elementi che costituiscono il sistema di conversione: massima coppia applicabile all'asse del generatore elettrico, massima potenza gestibile dall'elettronica di controllo del generatore, massimo carico sui cuscinetti di sostegno del giroscopio, massima velocità di rotazione del giroscopio.

Nella prima fase del progetto sono state analizzate diverse geometrie di scafo (Figura 239), variandone sia le dimensioni sia il materiale, nonché la forma e la distribuzione della massa di zavorra. Altro fattore di fondamentale importanza è stato il contenimento dei costi realizzativi.

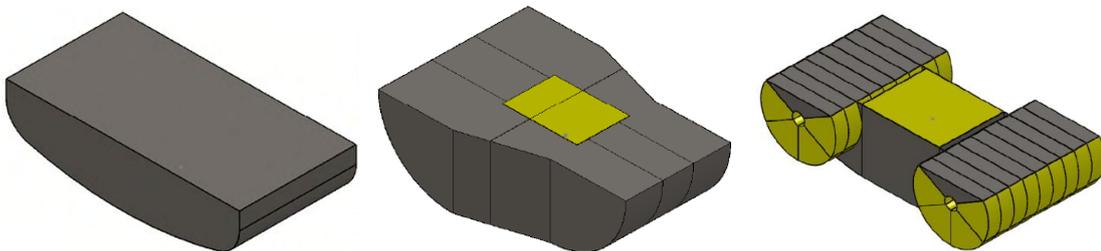


Figura 239. Esempi di soluzioni di scafo valutate: culla simmetrica; culla senza simmetria trasversale; scafo modulare ibrido

Nella seconda fase è stato analizzato il gruppo giroscopico ed il suo accoppiamento con il generatore elettrico. Anche in questo caso sono state valutate diverse forme del volano avendo come obiettivi la riduzione degli angoli di flessione dell'albero di supporto, la riduzione della massa, il contenimento dei costi di realizzazione e di trasporto (Figura 240).

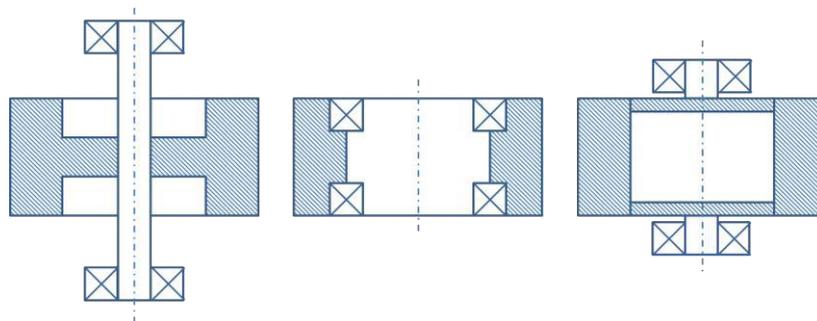


Figura 240. Esempi di soluzioni di volano valutate: soluzione classica; soluzione ad anello; soluzione a cilindro

In seguito ad analisi tecniche e logistiche è stata valutata una soluzione modulare con più di un gruppo di conversione giroscopio/generatore elettrico funzionanti in parallelo. La soluzione con due gruppi giroscopio/generatore si è rivelata ottimale poiché consente di impiegare componenti commerciali, quindi meno costosi e più affidabili, e realizza una sensibile riduzione dei costi di produzione del volano e dei costi di trasporto dei singoli gruppi di conversione.

La terza fase è stata caratterizzata dall'ottimizzazione del gruppo giroscopico/generatore elettrico in termini di taglia del generatore elettrico e dell'elettronica di gestione della potenza, velocità angolare del volano, dissipazioni energetiche. Per prima cosa sono stati individuati i valori ottimali della coppia di saturazione del generatore elettrico e la massima potenza gestibile dall'elettronica di controllo della macchina. In seguito è stata fatta una analisi sui consumi energetici dei cuscinetti di supporto del volano al fine di massimizzare l'energia netta prodotta. Quest'ultimo punto ha portato ad una revisione del layout di montaggio dei cuscinetti, ad una riduzione dei carichi massimi agenti sui cuscinetti di supporto e ad una più attenta gestione della velocità di rotazione del volano. Al termine del processo di ottimizzazione il valore della produttività annua stimata è aumentato del 37%.

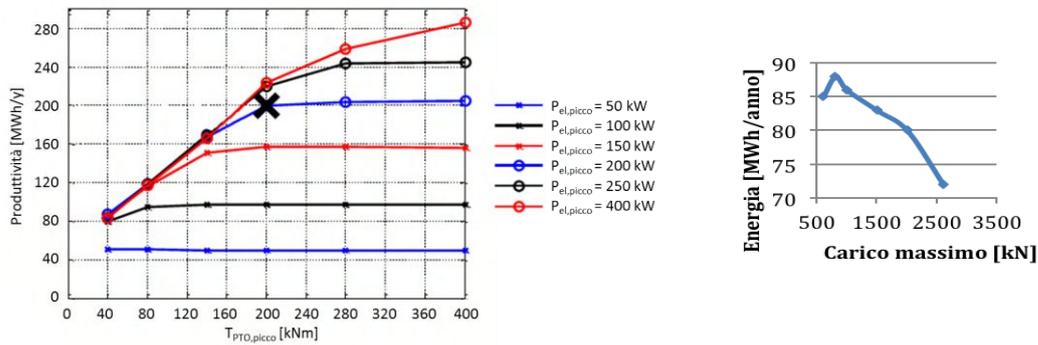


Figura 241. Taglia ottimale per il generatore elettrico e per l'elettronica di potenza. Produttività netta in funzione del carico massimo sui cuscinetti: riducendo il carico massimo è possibile ottimizzare la taglia dei cuscinetti stessi

Nella quarta fase è stato analizzato il volano dal punto di vista strutturale. L'obiettivo è stato quello di limitare le tensioni e le deformazioni del volano, con particolare attenzione alle zone attorno alle saldature ed ai semialberi di supporto. Per prima cosa sono state valutate diverse soluzioni di rinforzo per l'anello esterno tali da ridurre le deformazioni dovute alle azioni centrifughe. Infine sono stati analizzati i semialberi di supporto del volano e le sollecitazioni derivanti dalle forze giroscopiche. È stata verificata la resistenza del collegamento (piantaggio con interferenza e flangia bullonata) tra i semialberi ed il corpo centrale del volano

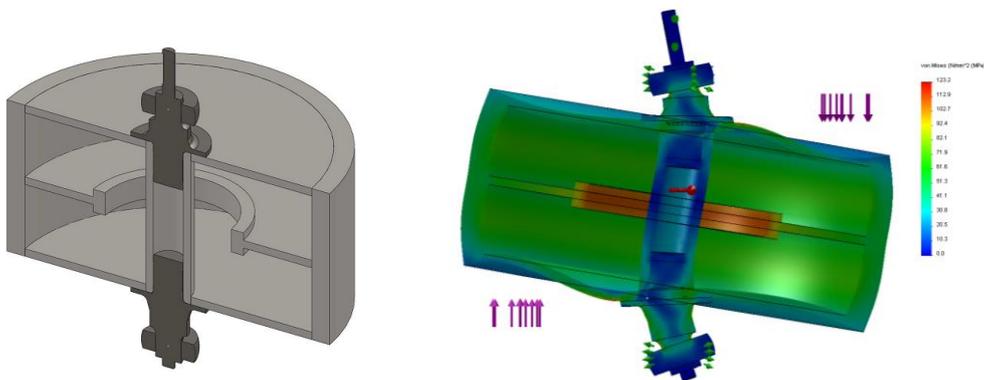


Figura 242. Soluzione scelta per il volano e rappresentazione grafica delle sollecitazione del volano sottoposto alle azioni centrifughe e giroscopiche

Infine nell'ultima fase è iniziata la definizione di una logica di controllo per l'ottimizzazione delle prestazioni del sistema durante il funzionamento nel mare reale. Questa logica ha come input il moto dello scafo ed il moto del giroscopio. Tramite una mappatura del funzionamento del sistema e la stima del comportamento dinamico dello scafo, viene inviato un riferimento di coppia all'asse del generatore elettrico. Questo riferimento di coppia è funzione sia dei parametri di ottimizzazione del sistema, sia delle limitazioni di coppia e velocità del generatore elettrico, nonché del carico massimo ammissibile sui cuscinetti di supporto del volano.

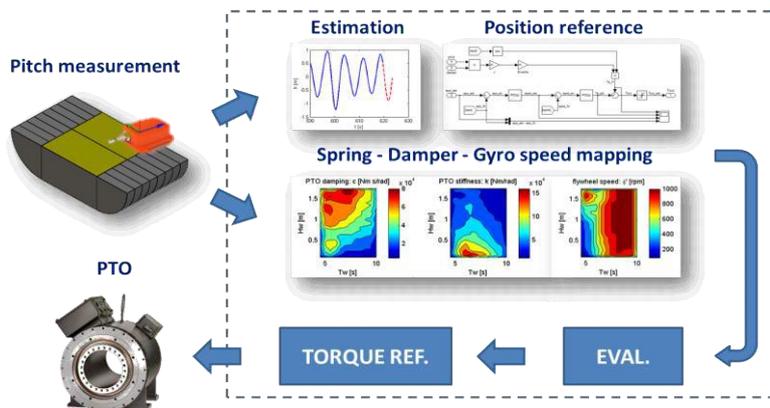


Figura 243. Schema di funzionamento del sistema di controllo

L'attività è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/2013/084.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università Mediterranea di Reggio Calabria

Le attività dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria hanno riguardato l'elaborazione dei dati meteomarini da modelli ad alta risoluzione in prossimità di aree portuali nel Mediterraneo e l'ottimizzazione di dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali. Queste attività ricadono all'interno degli obiettivi a e b. In sintesi il lavoro svolto ha riguardato:

- Elaborazione dati di moto ondoso in 31 località delle aree costiere mediterranee;
- Trasposizione in costa dei dati meteo-marini (sia climatologici che di previsione);
- Progettazione di un dispositivo U-OWC per una assegnata località;
- Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare;
- Progettazione di test sperimentali.

Politecnico di Torino

Le attività del Politecnico di Torino hanno riguardato la progettazione di un sistema di produzione di energia da moto ondoso in scala reale di tipo *point absorber*. Queste attività ricadono all'interno dell'obiettivo d. Le attività svolte sono state le seguenti:

- Descrizione del principio di funzionamento del dispositivo di conversione e dei suoi componenti costitutivi (giroscopio, scafo e generatore elettrico).
- Dimensionamento preliminare dello scafo, giroscopio e PT (*power take-off*)
- Valutazione delle prestazioni mediante un modello linearizzato ed ottimizzazione della produttività.
- Studio della struttura galleggiante e sviluppo di tre diverse soluzioni: calcestruzzo, acciaio e ibrida.
- Studio del sistema meccanico di conversione e sviluppo di tre diverse soluzioni: giroscopio classico, ad anello e cilindrico.
- Studio del sistema elettrico e minimizzazione dei consumi
- Studio della logica di controllo del sistema di conversione

Università Federico II di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Le attività dell'Università di Napoli hanno riguardano l'esecuzione di una campagna di misura delle correnti di marea nelle vicinanze del punto di maggiore energia dello Stretto di Messina. Queste attività ricadono all'interno dell'obiettivo c. Il lavoro svolto ha previsto le seguenti fasi:

- Scelta del sistema di misura delle correnti che permetta di effettuare il profilo completo dei vettori velocità di corrente dal fondo del mare fino alla superficie
- Realizzazione e installazione in mare del sistema
- Rilievo delle misure ed analisi dei dati rilevati

Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Il passaggio ad un sistema energetico low-carbon basato su una massiccia penetrazione delle fonti rinnovabili sarà un processo graduale che vedrà ancora, nel breve termine, l'utilizzo di combustibili fossili, principalmente gas naturale e carbone, che rappresentano al momento le fonti energetiche più economiche. E' necessario quindi un grande sforzo di ricerca sui sistemi di cattura e sequestro dell'anidride carbonica, per evitare di incidere negativamente sulle emissioni di CO₂ in atmosfera.

L'utilizzo di tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage) può ridurre dell'80-90% le emissioni di CO₂ causate dagli impianti di potenza, a scapito tuttavia di una penalizzazione energetica (e quindi anche economica) dell'ordine di 8-10 punti percentuali in termini di efficienza.

Nel settore della ricerca e sviluppo delle tecnologie CCS, vi è un forte impegno internazionale rivolto da una parte alle problematiche di ottimizzazione impiantistica, ai fini di una applicazione immediata delle CCS nei prossimi impianti di potenza in fase di progetto (impianti "capture ready"), dall'altra alla messa a punto di tecnologie completamente nuove che consentano di ottenere risultati prestazionali, in termini di efficienza e di costo, migliori di quelli ottenibili con tecnologie ritenute mature.

Molte delle tecnologie CCS sono già oggi disponibili ma hanno bisogno di essere integrate opportunamente con l'impiantistica di produzione per minimizzare le perdite energetiche ed i costi aggiuntivi ad esse associate. Ciò che manca è quindi una robusta attività di dimostrazione dell'esistente, per fornire indicazioni quantitative certe sui costi del sequestro, alle attuali tecnologie, che si affianchi ad una altrettanto significativa attività di ricerca di soluzioni più avanzate ed innovative, e perciò con orizzonti temporali non immediati.

A livello internazionale sono in corso numerose iniziative volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie CCS, e per la definizione di accordi politici sui limiti delle emissioni di CO₂. Sul fronte nazionale, ma in linea con gli indirizzi europei, una adeguata attività di R&S svolta dal sistema della ricerca pubblica e più in particolare dall'ENEA, consentirà di conseguire due obiettivi di interesse strategico, che si concretizzeranno nel contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni italiane di CO₂ e nel consentire al sistema industriale nazionale di competere in campo internazionale con i principali attori tecnologici nel prossimo futuro.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto ha per finalità lo sviluppo, la validazione teorica e sperimentale e la dimostrazione, su scala significativa, di un ventaglio di tecnologie innovative per l'impiego sostenibile di combustibili fossili, sia per la produzione di elettricità con ridotte emissioni di gas serra, sia per la produzione di combustibili liquidi o gassosi (nel caso di carbone). Elemento comune per la sostenibilità ambientale di tali combustibili, è rappresentato, oltretutto dall'incremento di efficienza, dalla contestuale separazione della CO₂ e il suo successivo stoccaggio o riutilizzo (tecnologie CCUS: Carbon Capture Utilization and Storage).

Il Progetto comprende sia attività di nuova impostazione sia attività a prosecuzione e completamento di quelle condotte nel precedente Piano Triennale.

Il "panel" di tecnologie proposte è caratterizzato da un diverso grado di maturità, pertanto alcune di queste, con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, vengono applicate e studiate su facility di prova di scala pilota pre-industriale, per altre, caratterizzate da soluzioni tecniche più avanzate e innovative, sia in termini di prestazioni energetiche che ambientali, si punta alla loro dimostrazione su scala di laboratorio o pilota, essendo infatti indirizzate a soluzioni nel medio-lungo periodo.

Vista la complessa articolazione del Progetto, il risultato previsto, su scala triennale, è rappresentato da un ventaglio di prodotti, riassumibili in:

- sperimentazione di tecnologie di cattura più mature (tipicamente post-combustione) su impianti sperimentali di ENEA e della partecipata Sotacarbo, tese in particolare alla riduzione dei costi delle stesse ed alla loro controllabilità;
- sviluppo e dimostrazione di una innovativa tecnica di pirolisi e separata gassificazione, per il trattamento di carboni di basso rango;
- dimostrazione di una tecnologia innovativa di sequestro della CO₂ basata sull'impiego di sorbenti solidi ad alta temperatura, con contemporaneo gas-cleaning del syngas e produzione di idrogeno per applicazioni energetiche ;
- sviluppo di solventi liquidi e di sorbenti solidi della CO₂, caratterizzati da una maggior efficienza di cattura, ciclabilità e minor tossicità;
- sviluppo di metodologie innovative per il trattamento dei combustibili gassosi (syngas da carbone o di opportunità) e la loro purificazione da inquinanti (composti dello zolfo, tar);
- ampliamento dello spettro di utilizzo di carboni di basso rango, con particolare riferimento al carbone Sulcis;
- messa a punto di tecnologie alternative al sequestro geologico, per il riuso della CO² separata, con produzione di combustibili e chemicals, e per la cattura in forma chimica;
- sviluppo di modelli descrittivi di fenomenologie complesse, che hanno come destinazione, oltre all'ovvia acquisizione di competenze, lo sviluppo di metodi di progettazione di componenti avanzati, in primis bruciatori, ma anche gassificatori, reattori di carbonatazione, dispositivi di separazione della CO₂, ecc);
- sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas, il cui impiego è comunque intimamente connesso alle tecnologie CCS, caratterizzati da tecniche di combustione più avanzate, a più alta efficienza e stabilità, e meno inquinanti;
- studio delle problematiche di instabilità legate all'impiego energetico di syngas a basso potere calorifico volumetrico perché ricchi di idrogeno, prodotti in processi di gassificazione;
- sviluppo di diagnostica e di sistemi di controllo principalmente per le fasi di gassificazione e combustione;
- sviluppo e test di cicli turbogas innovativi di tipo "capture ready", basati sulla combustione in atmosfera di CO₂ e O₂;
- acquisizione di competenze "sul campo" relative alla gestione di una rete di monitoraggio di un sito di stoccaggio geologico della CO₂ (acquiferi salini profondi in strati carboniferi del bacino Sulcis) con metodi tradizionali, e sviluppo di metodologie innovative di monitoraggio;
- assicurare, in collaborazione con il MSE, una presenza tecnicamente qualificata in sedi internazionali quali: Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), gruppi di lavoro della IEA, European Energy Research Alliance (EERA), ecc..

Le tecnologie più innovative, volte ad una applicazione nel medio termine, saranno concentrate su due grosse piattaforme sperimentali: la Piattaforma Zecomix, finalizzata allo studio di processi più innovativi di decarbonatazione con sorbenti solidi e trattamento gas, in linea con le più avanzate ricerche internazionali, e l'impianto AGATUR per lo studio di cicli termodinamici avanzati che si avvale di una microturbina a gas da 100 kWe.

Poiché l'attività è estremamente ampia in termini di problematiche affrontate, tecnologie (generalmente pre-industriali) e metodologie di indagine, anche la struttura del Progetto risulta fortemente articolata. Pertanto, in relazione agli obiettivi finali dell'attività, in precedenza descritti, la stessa è stata articolata in Obiettivi e Sub-Task.

Entrando più nel dettaglio, con riferimento alla cattura operata in post-combustione sui fumi (Obiettivo a), lo studio è stato indirizzato allo sviluppo di nuovi solventi liquidi, alternativi agli attuali, caratterizzati da più elevate efficienze e minor tossicità. È opportuno sottolineare che tali solventi possono e saranno applicati anche al "lavaggio" di syngas in configurazioni di cattura pre-combustione.

Per quanto riguarda le tecnologie di cattura pre-combustione (Obiettivo b), comportando generalmente il passaggio attraverso una fase di pre-trattamento del combustibile (gassificazione e clean-up), l'attività si è articolata in tre Sub-Task :

- Sub-Task b.1, relativo alla ottimizzazione della tecnologia nota di gassificazione, trattamento e conversione del syngas, e al parallelo sviluppo di un innovativo processo di pirolisi e gassificazione separate;
- Sub-Task b.2, relativo alla produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS;
- Sub-Task b.3, relativo alla cattura della CO₂ con sorbenti solidi basati su Ossidi di Calcio. Questi ultimi possono e saranno testati anche in configurazioni di cattura post-combustione, su fumi.

Con riferimento alla cattura in pre-combustione e in ossi-combustione è opportuno sottolineare come un ruolo estremamente significativo sia giocato dall'ottimizzazione del processo di combustione, nel primo caso legato

all'impiego di syngas molto ricchi di idrogeno in turbo-gas, nel secondo caso in relazione all'impiego di ossigeno puro in luogo di aria come comburente. A queste problematiche intende dare risposta l'Obiettivo c, che prevede due Sub-Task:

- Sub-Task c1, relativo allo sviluppo di metodologie numeriche per la simulazione e la progettazione di componenti;
- Sub-Task c2, relativo allo sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas operanti con syngas.

Sempre con riferimento alle tecnologie CCS, l'Obiettivo d ha per oggetto lo studio di cicli turbogas non convenzionali, caratterizzati da elevata efficienza, operanti con miscele comburenti di tipo CO₂/O₂, e quindi "capture ready"

L'Obiettivo E infine attiene al tema centrale del sequestro definitivo della CO₂, di tipo geologico, chimico o connesso al suo utilizzo. L'attività si è pertanto articolata nei seguenti Sub-Task:

- Sub-Task e1, relativo alla realizzazione/sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO₂ ed alla elaborazione di linee guida per la progettazione di una generica rete di monitoraggio ;
- Sub-Task e2, relativo all'utilizzo o alternativo fissaggio chimico della CO₂;
- Sub-Task e3, relativo ad attività di advisor nazionale per le tecnologie di Cattura e Sequestro della CO₂.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO₂ in post-combustione

Le attività riguardano l'ottimizzazione del processo di cattura della CO₂ mediante l'impiego di solventi liquidi. Lo studio è in particolare indirizzato:

- allo sviluppo di nuovi solventi liquidi, già introdotti nella precedente annualità, alternativi agli attuali (ammine diluite in liquidi organici anziché acqua e soluzioni basiche di resorcinolo), caratterizzati da più elevate efficienze e minor tossicità;
- all'ottimizzazione nell'uso di solventi tradizionali a base di ammine, relativamente alle fasi di cattura e rigenerazione, ed al controllo on-line del carico di CO₂, operato con strumentazione convenzionale on-line (misure di PH e densità).

Nel complesso delle attività, particolare attenzione viene rivolta alla valutazione dell'efficienza di cattura, della capacità di assorbimento specifico di CO₂ all'interno del singolo solvente, e della sua capacità di rigenerazione, del degradamento delle prestazioni del solvente utilizzato al variare del numero di cicli, della quantità specifica di energia necessaria alla rigenerazione. Tutte queste grandezze sono determinate variando i principali parametri di processo quali la tipologia e la concentrazione di solvente, la tipologia e la composizione delle correnti gassose trattate, le portate delle correnti liquide e gassose, la temperatura di rigenerazione.

Le attività sono state, svolte in laboratorio per quanto riguarda i nuovi solventi, e sulle facility sperimentali di Sotacarbo per quanto riguarda quelli classici.

a.1 Sviluppo e test di solventi innovativi, caratterizzati da minori consumi energetici e minor tossicità

L'azione ha riguardato l'ottimizzazione del processo di cattura della CO₂ mediante l'impiego di solventi liquidi innovativi, sia a base di ammine che non, in condizioni che simulano, grazie all'utilizzo di apposite miscele di gas, quelle di pre- e di post-combustione, tipiche della cattura operata sul syngas proveniente dalla gassificazione del carbone e sui fumi provenienti dalla combustione di carbone o gas in caldaie e turbine a gas.

I solventi e le tecnologie oggetto di indagine, già introdotti nella precedente annualità, riguardano in particolare:

- tecnologie, basate su ammine diluite in liquidi organici anziché acqua (tecnologia "water free"), caratterizzate da consumi energetici inferiori in fase di rigenerazione;
- soluzioni basiche di resorcinolo, innovativo solvente a bassa tossicità, brevettato da ENEA, anch'esso caratterizzato da vantaggi energetici significativi.

Le prove sperimentali per misurare l'efficienza di cattura di CO₂ sono state eseguite, presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Firenze, in sistemi continui a ciclo chiuso di assorbimento e desorbimento con rigenerazione del solvente: in questi sistemi il liquido viene fatto circolare con continuità fra l'assorbitore e il desorbitor mantenenuti alle temperature prefissate mediante sistemi termostatici; la miscela gassosa contenente percentuali variabili di CO₂ (il rimanente è aria oppure N₂ e può contenere anche H₂S) fluisce in controcorrente.

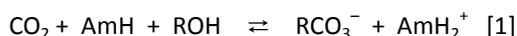
L'efficienza di cattura di CO₂ è misurata con continuità mediante analisi gascromatografica mentre la speciazione dei prodotti in soluzione è analizzata e quantificata mediante l'analisi NMR di ¹³C.

In questo ambito, per quanto riguarda le ammine diluite in liquidi organici, il lavoro sperimentale ha avuto per oggetto lo studio delle seguenti ammine:

- 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP), (CH₃)₂-C(NH₂)-CH₂-OH
- 2-(*t*-butilammino)etanolo (TBMEA), [(CH₃)₃C]-NH-CH₂-CH₂-OH
- 2-(*i*-propilammino)etanolo (IPMEA), [(CH₃)₂CH]-NH-CH₂-CH₂-OH

Il solvente non acquoso impiegato è una miscela di glicol etilenico (HO-CH₂-CH₂-OH) e propanolo (CH₃-CH₂-CH₂-OH) in rapporto 1/1 in volume. Sono usate sia le ammine singole sia loro miscele 1/1 con concentrazione complessiva 3,0 mol dm⁻³. L'assorbimento di CO₂ (15% vol in aria) e la rigenerazione delle ammine avvengono in un sistema a ciclo continuo simile. Le temperature di assorbimento e di desorbimento sono fissate rispettivamente a 20 e 90-95 °C.

In ambiente non acquoso, le reazioni di CO₂ con la miscela ammina/alcol sono (AmH indica l'ammina; R = CH₃(CH₂)₂, HOCH₂CH₂):



con formazione del carbonato alchilico [1] e del carbammato dell'ammina [2]. Le medesime ammine in soluzione acquosa producono in massima parte HCO₃⁻. L'efficienza dell'assorbimento di CO₂ nelle migliori condizioni operative è stata del 95% e non è influenzata dalla presenza di H₂S nella miscela gassosa. La sua cattura è stata eseguita con H₂O₂, utilizzando l'apparato in Figura 244, più oltre riportata. La stabilità termica delle ammine impiegate è stata verificata mediante l'analisi NMR di ¹³C dopo il loro riscaldamento a 100 °C per la durata di 30 giorni: gli spettri delle soluzioni finali sono identici a quelli delle ammine e dei solventi delle prove in bianco.

La carbonatazione di AMP e TBMEA nell'etere monometilico del glicol dietilenico provoca la precipitazione dei carbammati corrispondenti allo stato solido nell'assorbitore e quindi preclude la loro rigenerazione nel desorbitore. In questi esperimenti, lo stesso reattore funziona da assorbitore (a 20 °C) nel primo stadio del processo e, dopo che l'assorbimento è stato completato (3 h), opera da desorbitore a 80 °C (60 min). L'assorbimento medio su tre cicli si è mantenuto intorno al 90-95 %.

Per quanto attiene al secondo tema, soluzioni basiche di resorcinolo, esso ha come oggetto la cattura chimica reversibile di CO₂ con resorcinolo (1,3-benzendiolo) in soluzioni basiche di acqua e glicerina, per verificarne l'efficienza sia come resa dell'acido β-resorcilico (acido 2,4-diidrossobenzoico) che come efficienza di assorbimento in sistemi continui a ciclo chiuso.

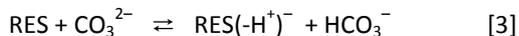
L'uso di soluzioni acquose di glicerina (in rapporto 1/1 v/v) è imposto dalle alte temperature di esercizio (fino a 170 °C). L'acqua è indispensabile per garantire la solubilità dei prodotti carbossilati e per diminuire la viscosità delle soluzioni. Sono state eseguite numerose prove preliminari di assorbimento e, separatamente, di desorbimento variando le condizioni operative, in particolare la base impiegata (K₂CO₃, KHCO₃, KOH e loro miscele), la concentrazione del resorcinolo (0,5, 1,0 e 2,0 mol dm⁻³), il rapporto resorcinolo/base (da 1/1 a 1/6), la concentrazione di CO₂ (0, 12 e 100%) nella miscela gassosa, le temperature di assorbimento (90-140 °C) e desorbimento (150-170 °C) e, infine, il tempo di reazione (1-5 h). Da queste prove preliminari *batch* si sono ricavate le condizioni operative atte a:

- 1) ottenere la massima efficienza di carbossilazione della resorcina;
- 2) verificare gli effetti di O₂ e di H₂S sull'efficienza della carbossilazione;
- 3) massimizzare l'assorbimento reversibile di CO₂ in un processo ciclico funzionante in continuo.

I risultati sperimentali indicano che l'efficienza della carbossilazione del resorcinolo aumenta:

- col tipo di base: K₂CO₃ > KHCO₃ > KOH;
- col rapporto base/resorcinolo; ad esempio a 130 °C, con CO₂ = 100% e con K₂CO₃/resorcinolo 1/1 è 38%; 1,5/1 è 57%; 6/1 è 7%;
- con la temperatura di assorbimento, ma fino a un massimo di 110-130 °C; a temperature superiori l'efficienza diminuisce;
- con la concentrazione di CO₂ e col tempo di assorbimento: con K₂CO₃/resorcinolo 1,5/1 a 130 °C *in assenza di CO₂* è 29%; è 59% con CO₂ al 100%, dopo 1 h di assorbimento.

La formazione del 29% dell'acido β -resorcilico a 130 °C in assenza di CO_2 è il risultato che determina le condizioni operative dei cicli continui di assorbimento-desorbimento poiché la formazione dell'acido è accompagnata da emissione di CO_2 che va a diminuire l'efficienza di assorbimento fino al punto che lo stadio di assorbimento *può emettere CO_2 anziché assorbirlo*. Sulla base dei molti risultati ottenuti, si può ipotizzare il seguente meccanismo di carbossilazione del resorcinolo con CO_2 in presenza della base K_2CO_3 (con KHCO_3 è analogo ma meno efficiente a causa della sua minore basicità): la carbossilazione ha inizio con la deprotonazione della resorcina:



A temperature superiori a 90 °C avviene la decomposizione di HCO_3^-



Appena formato, CO_2 va a reagire con la resorcina deprotonata

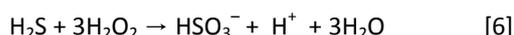


La reazione [4], che produce *in situ* la specie reattiva CO_2 , è endotermica e quindi è favorita dalla temperatura. Tuttavia, l'aumento della temperatura favorisce anche la perdita di CO_2 dalla soluzione e sposta la reazione [5], esotermica ma lenta, a sinistra, anche se la rende più veloce. CO_2 che fluisce in controcorrente nell'assorbitore reagisce in parte col resorcinolo deprotonato (reazione [3]) e in parte col carbonato (inverso della reazione [3]), riformando il bicarbonato e il processo può continuare.

In un sistema ciclico di assorbimento-desorbimento le reazioni [4] e [5] non raggiungono l'equilibrio e la cinetica, presumibilmente, prevale sulla termodinamica. La temperatura di assorbimento è decisiva: se è troppo alta (> 110 °C) la quantità di CO_2 che deriva dalla reazione [4] è maggiore di quella catturata dalla reazione [5] e CO_2 è *emesso dall'assorbitore* anziché essere assorbito. Se la temperatura è troppo bassa (< 70 °C), la velocità della reazione [5] è bassa e l'assorbimento è modesto. Dopo numerose prove cicliche con esiti insoddisfacenti, sono state adottate due diverse strategie che danno risultati analoghi. In un caso la soluzione di resorcinolo/base viene preventivamente riscaldata in recipiente aperto per 7-10 ore a 130-170 °C in corrente di N_2 : la soluzione emette CO_2 producendo 5-34% di RES-CO_2^- . Questa soluzione degassata viene usata nei cicli continui con temperature di assorbimento di 70-130 °C, di desorbimento 150-170 °C. Con resorcinolo 2,0 mol dm^{-3} e miscele 1/1 delle basi KHCO_3/KOH oppure $\text{KHCO}_3/\text{K}^2\text{CO}_3$ l'efficienza massima di assorbimento è stata dell'80% con formazione del 40% dell'acido β -resorcilico alla temperatura di assorbimento di 110 °C e di desorbimento a 170 °C. Secondo un'altra metodologia, le soluzioni del resorcinolo con le basi K_2CO_3 , KHCO_3/KOH , $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{KOH}$ oppure $\text{KHCO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ sono usate tal quali nel processo ciclico con assorbimento a temperature crescenti di 70, 90, 110 °C e di desorbimento a 170 °C. La massima efficienza di cattura di CO_2 è stata l' 80 a 70-90 °C. A 110 °C è minore del 50%.

Per verificare gli effetti dell'ossidazione del resorcinolo e della presenza di H_2S nella miscela gassosa, si è usato una miscela di CO_2 in aria contenente anche 50 ppm di H_2S . Le soluzioni impiegate sono quelle standard di resorcinolo 2,0 mol dm^{-3} contenenti K_2CO_3 3,0 mol dm^{-3} . L'efficienza di carbossilazione nei processi *batch* è intorno al 57-60% e l'efficienza di cattura di CO_2 nei sistemi ciclici è comparabile con quella ottenuta senza il solfuro e senza aria. Gli spettri NMR di ^{13}C mostrano che insieme all'acido β -resorcilico, si forma anche una piccola quantità (3-5% totale) di acido γ -resorcilico. Non ci sono segnali apprezzabili di altre specie. In conclusione, né l'ossidazione né la presenza di H_2S influiscono in modo significativo sull'efficienza di carbossilazione del resorcinolo e di cattura di CO_2 .

La cattura di H_2S e la sua separazione da CO_2 è stata ottenuta in modo semplice ed efficace ossidandolo con una soluzione di H_2O_2 secondo la reazione



HSO_3^- è stato separato dalla soluzione precipitandolo come CaSO_3 con la quantità stechiometrica di CaO che neutralizza contemporaneamente l'acidità prodotta dalla reazione [6]. H_2S è catturato dalla miscela di CO_2 e H_2S che esce dall'assorbitore (Figura 244). La cattura di H_2S è totale come si è verificato con due trappole a CuCl_2 sciolto in acqua. La funzionalità del sistema è stata verificata anche in presenza di quantità apprezzabili del solfuro, aggiungendo 5,0 g di $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (0,021 mol) alla soluzione della resorcina.

Le attività sperimentali condotte sui due sistemi-solventi innovativi portano ad alcune conclusioni preliminari.

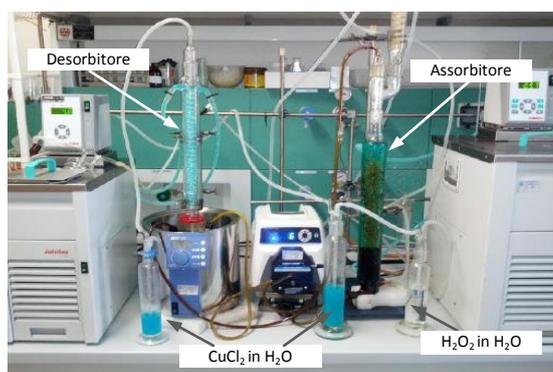


Figura 244. Apparato funzionante in continuo per la cattura di CO_2 con resorcinolo e separazione di H_2S

L'obiettivo che ci è posti è stato quello di modificare o riformulare liquidi assorbenti per massimizzarne i vantaggi riducendone gli svantaggi: il solvente ideale non esiste. Qualunque tecnologia per la cattura e la separazione di CO₂ deve necessariamente cercare di massimizzare il bilancio [CO₂ assorbito - CO₂ emesso], dove CO₂ emesso è quello complessivamente emesso all'origine per produrre energia. Il maggiore vantaggio delle soluzioni idroalcoliche del resorcinolo risiede nella sua funzionalità costante anche nell'uso molto prolungato in atmosfera di O₂ e di H₂S: non sembrano esistere problemi di degradazione. Lo svantaggio maggiore sembra essere l'efficienza non molto elevata (80%) a fronte di temperature di assorbimento e desorbimento molto più elevate di quelle delle ammine e quindi debbono essere usate miscele alto bollenti (nel nostro caso glicerina e acqua). Al contrario, le ammine in solventi non acquosi garantiscono un'efficienza di cattura di CO₂ molto elevata (> 90%) pur a temperature di desorbimento relativamente basse (80-95 °C). Inoltre, le ammine impiegate mostrano di avere un'apprezzabile stabilità termica, ossidativa e nei confronti dei prodotti solforati. D'altra parte, l'assenza di acqua presenta potenziali vantaggi energetici nel processo di desorbimento-rigenerazione poiché i solventi organici impiegati hanno capacità termica ed entalpia di evaporazione circa 1/2 rispetto all'acqua. Anche l'entalpia di rigenerazione è prevedibilmente minore di quella delle tradizionali soluzioni acquose delle ammine. A fronte di questi potenziali vantaggi, l'uso molto prolungato delle ammine in atmosfera ossidante può dare origine a prodotti di degradazione potenzialmente nocivi: ciò pone severi problemi di compatibilità ambientale, finora scarsamente presi in considerazione.

I risultati delle attività sopra riportate sono descritte in dettaglio nel rapporto RdS/2013/193.

Sul tema, soluzioni basiche di resorcinolo, l'ENEA ha concentrato l'attività in prove "in flusso" di assorbimento e rigenerazione, al momento come fasi indipendenti e non con continuità.

Nelle relazioni relative alle precedenti annualità sono stati discussi gli aspetti di base della proposta di usare il resorcinolo in soluzione alcalina come solvente per la cattura della CO₂. Sono state illustrate le reazioni su cui si basa il metodo e sono state fornite le prove della sua applicabilità all'assorbimento e desorbimento della CO₂ in un range che è paragonabile a quello in cui operano le ammine. Le prime prove sperimentali eseguite in un reattore "batch" hanno fornito le indicazioni necessarie alla successiva attività sperimentale, sviluppata nella presente annualità, condotta in reattori che lavorano "in flusso", quindi in condizioni più vicine a quelle operative.

L'assorbimento della CO₂, tramite reazione di Kolbe-Schmitt, sul resorcinolo è stata condotta nell'intervallo di temperatura compreso fra 80 e 120 °C ed ha usato come base sia il KOH che il K₂CO₃; la pressione della CO₂ è stata mantenuta fissa ad 1 bar.

L'apparato sperimentale consente sia l'esecuzione di assorbimenti e desorbimenti indipendenti fra loro che la possibilità di operare in un ciclo continuo di assorbimento/desorbimento. Nella Figura 245 è riportato uno schema del loop realizzato da ENEA, costituito da due colonne in pirex (C1, C2), una pompa peristaltica multicanale per la movimentazione della soluzione (P), due termostati per il riscaldamento indipendente della colonna di assorbimento e di quella di desorbimento, 6 valvole a 3 vie per il controllo del flusso della soluzione. Operando sulle valvole V2, V5 e V4, V6 è possibile separare le due colonne e farle lavorare indipendentemente l'una dall'altra oppure far circolare la soluzione dalla colonna di assorbimento a quella di desorbimento e viceversa. La soluzione fresca viene caricata nelle due colonne e saturata di CO₂ attraverso l'ingresso R1. Quando viene raggiunta la saturazione, cioè la capacità di carico (CdC) per la temperatura fissata, mantenendo il flusso di CO₂ attraverso R1, si aumenta la temperatura nella colonna 2 per il desorbimento e si alimenta N₂ attraverso R2. La valvola di campionamento Vc permette di inviare al gascromatografo l'uscita della colonna 1 o della colonna 2.

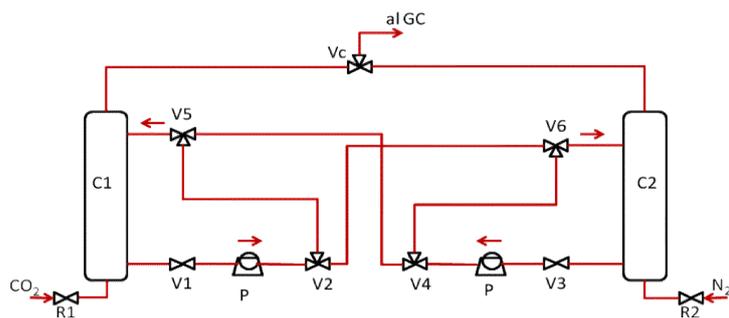


Figura 245. Schema dell'apparato sperimentale

L'attività pregressa ha permesso di stabilire le condizioni necessarie a raggiungere l'equilibrio di assorbimento fra resorcinolo e CO₂ in condizioni di temperatura variabili fra 80 e 120 °C e con pressione parziale di CO₂ pari a 3 atm. Riassumendo i risultati possiamo dire che l'equilibrio viene raggiunto dopo 1 h e che la CdC aumenta con la temperatura fino a 100 °C, mentre è poco sensibile all'ulteriore aumento a 120 °C. I valori di capacità di carico (moli di CO₂ assorbita per mole di molecola sorbente) ottenuti per le temperature di 80, 90, 100 e 120 °C, sono

rispettivamente del 15, 25, 35 e 37%. Una temperatura di assorbimento intorno a 100 °C è quindi sufficiente a far lavorare il solvente al meglio delle sue prestazioni.

Le prove con reattore in flusso hanno sostanzialmente confermato i risultati precedenti. In Figura 246 vengono riportate la capacità di carico e l'efficienza di assorbimento (EA: moli di CO₂ assorbite su moli di CO₂ inviate) in funzione del tempo alla temperatura di 90°C e alla p_{CO2}=1 atm con reattore in flusso e [KOH]/[Resorcina] = 2/1.

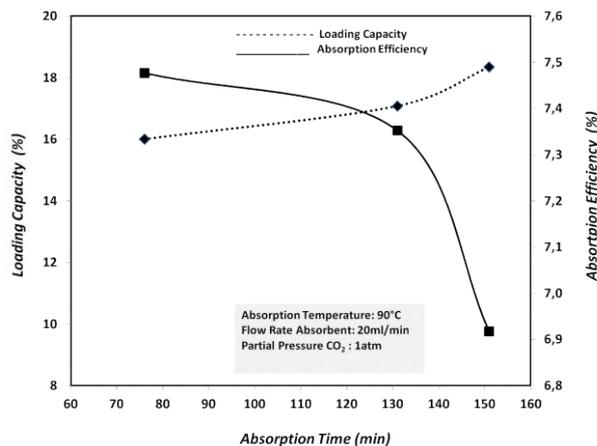


Figura 246. Capacità di Carico ed Efficienza di Assorbimento in funzione del tempo alla temperatura di 90°C e alla p_{CO2}=1 atm con reattore in flusso e [KOH]/[Resorcina] = 2/1

Come atteso si ha un piccolo incremento CdC col tempo di assorbimento mentre naturalmente cala la EA.

La velocità di ricircolo della soluzione sorbente di resorcinolo ha solo un piccolo effetto tanto sulla CdC che sulla EA, poiché le cinetiche di assorbimento sono nettamente inferiori rispetto ai tempi di contatto garantiti dalla colonna usata. La Figura 247 riporta questi due parametri al variare della velocità di ricircolo, quindi del tempo di contatto, quando la temperatura è di 90 °C ed il rapporto [KOH]/[Resorcina] = 2/1.

Poiché è riportato in letteratura che la reazione di carbossilazione del resorcinolo è favorita quando la base è il carbonato di potassio, mantenendo costanti tutti i parametri e scegliendo una velocità di ricircolo di 10 ml/min è stata impiegata questa base in rapporto [K₂CO₃]/[Resorcina] = 1/1. I risultati hanno mostrato, in queste condizioni, un incremento della capacità di carico fino a valori del 40%.

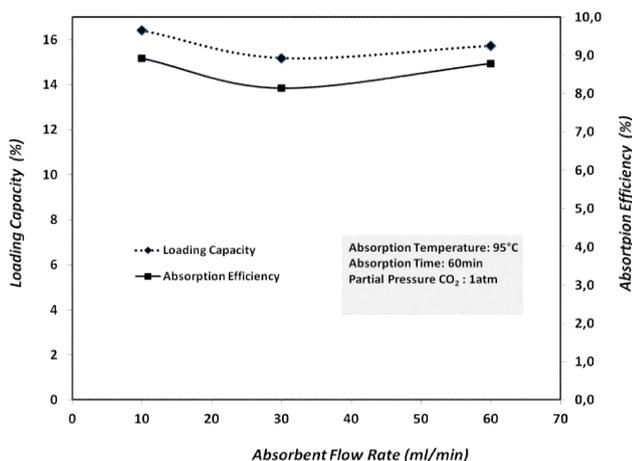


Figura 247. Capacità di carico ed efficienza di assorbimento in funzione della velocità di ricircolo alla temperatura di 90°C e alla p_{CO2}=1 atm con reattore in flusso e [KOH]/[Resorcina] = 2/1

Infine è stato studiato il desorbimento del CO₂. Poiché per questa operazione è necessario andare a temperature superiori a 100 °C, si sono impiegate soluzioni binarie di acqua/glicole etilenico (50 % v/v). Partendo da una soluzione che era stata precedentemente sottoposta ad assorbimento (90 °C, p_{CO2} =1 atm, [KOH]/[Resorcina] = 2/1) e lavorando con velocità di ricircolo di 20mL/min.

I parametri che maggiormente influiscono sul desorbimento sono la temperatura ed il pH della soluzione. Per le nostre soluzioni, il desorbimento inizia alla temperatura di 120 °C. Un tipico andamento del desorbimento in funzione del tempo per la temperatura di 120 °C e pH = 9,5 è riportato in Figura 248.

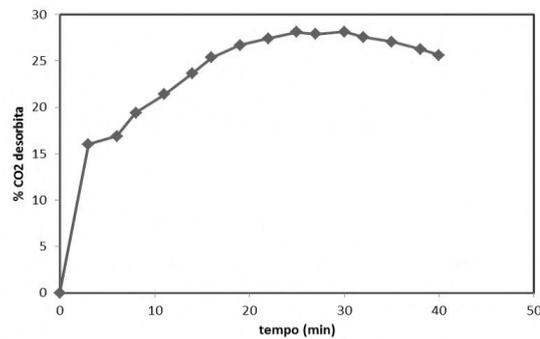


Figura 248. Desorbimento della CO₂ a T=120°C, φ_{N₂}=50 sccm, pH=9,5

Quando il pH è uguale a 12, non si osserva desorbimento fino alla temperatura di 150 °C. Per pH uguale a 6 e con flusso di azoto pari a 50 sccm si ha desorbimento a 150 °C e l'andamento in funzione del tempo è riportato in Figura 249.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/225 .

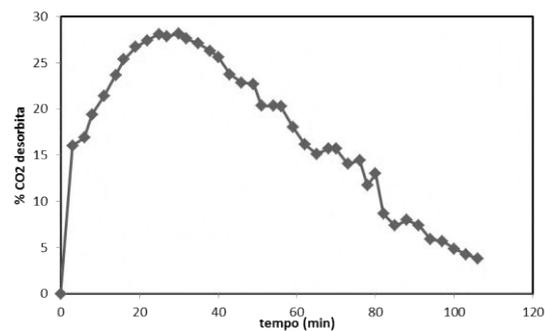


Figura 249. Desorbimento della CO₂ a T=150°C, φ_{N₂}=50 sccm, pH=6

a.2 Ottimizzazione nell'uso di ammine classiche, con particolare riferimento al controllo on-line ed alla fase di rigenerazione

L'attività svolta sul tema da Sotacarbo è stata organizzata nelle seguenti azioni:

- sperimentazione sistemi di cattura post combustione;
- attività di caratterizzazione dei sistemi di campionamento e analisi di liquidi e gas;
- analisi dei risultati dei test sperimentali.

Sperimentazione sistemi di cattura post combustione

Attività su Impianto Pilota

Nell'ambito della presente azione sono stati eseguiti test preliminari per verificare la funzionalità dei sistemi costituenti l'impianto, a seguito delle modifiche e integrazioni effettuate. Successivamente sono state avviate attività relative a:

- l'esecuzione, sull'impianto pilota, di test preliminari e l'avviamento delle sperimentazioni volte all'ottimizzazione del processo di cattura della CO₂ mediante l'impiego di solventi liquidi a base di ammine, in condizioni che simulano, grazie all'utilizzo di apposite miscele di gas, quelle di post-combustione, tipiche della cattura operata sui fumi provenienti dalla combustione di carbone in caldaie;
- l'esecuzione, sull'impianto da laboratorio GAIA, di test preliminari e l'avviamento delle sperimentazioni di assorbimento di CO₂ fino alla saturazione del solvente (MEA in soluzione acquosa), per la definizione delle cocorrelazioni tra densità e caricamento e tra pH e caricamento;

- la predisposizione di un documento di caratterizzazione dei sistemi di campionamento e analisi di liquidi e gas con la descrizione delle apparecchiature dei laboratori dal punto di vista delle:
 - caratteristiche tecniche;
 - tipologie di analisi con riferimento alle procedure utilizzate;
 - aspetti critici legati all'utilizzo;
 - possibilità di essere integrati con altre apparecchiature da laboratorio.

- Test e attività sperimentali sull'impianto pilota

Le attività sperimentali eseguite hanno riguardato la messa a punto dell'impianto di rigenerazione e di tutti i sistemi ausiliari ad esso collegati. In particolare sono stati eseguiti test sperimentali finalizzati a valutare l'efficienza di rigenerazione attraverso la caratterizzazione del solvente in ingresso ed in uscita dal sistema, in termini di densità e di pH della soluzione. Tale caratterizzazione è stata effettuata determinando il caricamento di CO₂ nelle soluzioni amminiche (moli di CO₂/moli di ammina) mediante titolazione. I componenti d'impianto testati sono stati: lo stadio di desolforazione a freddo impiegato come assorbitore di CO₂ ed alimentato con MEA 5 molare, il reattore di assorbimento della CO₂ a bolle (SAC) (Figura 250a), la sezione di rigenerazione (Figura 250b). E' stata utilizzata una miscela di gas costituita da 85% di N₂ e 15% di CO₂ (in volume).



Figura 250. Reattori a bolle e unità di rigenerazione dell'impianto pilota

Ulteriori sei prove hanno riguardato, con le medesime finalità, test con syngas prodotto dal gassificatore . Sono stati testati: carbone venezuelano, carbone con 20% Sulcis e miscela Sulcis (50%) + biomassa (50%).

- Test e attività sperimentali sull'impianto GAIA

Le attività sperimentali eseguite hanno riguardato la messa a punto dell'impianto di cattura CO₂ , da laboratorio (Impianto GAIA, Figura 251), e l'avvio dei primi test sperimentali.

Sono state eseguite le seguenti attività volte a verificare la funzionalità dei vari componenti del suddetto impianto:

- verifica generale dell'impianto di cattura CO₂, con manutenzione della raccorderia e del piping;
- test in bianco sulle pompe di rilancio delle ammine, con l'utilizzo di acqua e relativo lavaggio della colonna per la verifica a freddo delle tenute;
- verifica del funzionamento e taratura del sistema di campionamento e analisi gas (micro gascromatografo RACK3000 della SRA Instruments);
- verifica del sistema di acquisizione segnali;
- verifica di funzionamento a caldo della stazione termostatica per il riscaldamento dell'olio utilizzato per lo scambio termico necessario per la rigenerazione dell'ammine;
- verifica di tenuta a caldo del circuito dell'olio.

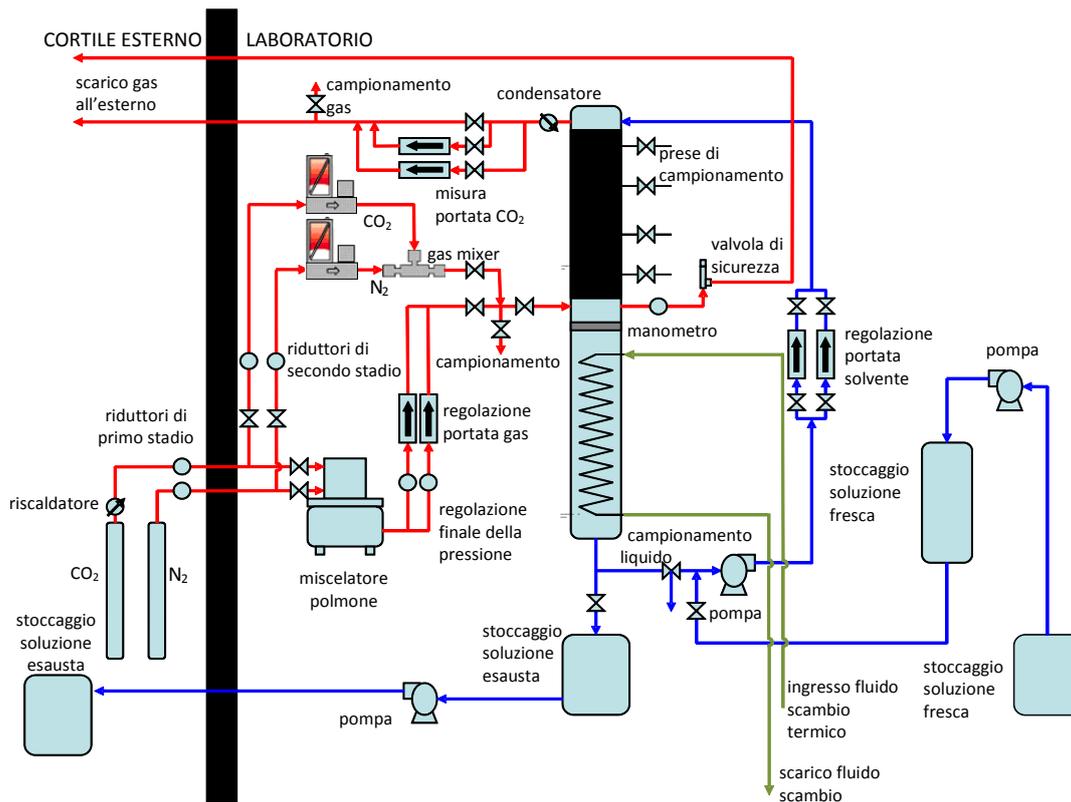


Figura 251. Impianto GAIA, per test di cicli di cattura-rigenerazione con solventi

In particolare, dopo una serie di test di tenuta dei circuiti gas e solvente, sono stati eseguiti i seguenti test e le seguenti attività sperimentali:

- prova di assorbimento con MEA 5M. In particolare è stato condotto un test a ciclo chiuso a pressione atmosferica a freddo;
- prova preliminare con MEA 5M per la raccolta dei dati di caricamento, pH e densità del solvente all'avanzare della reazione. In particolare è stato condotto un test di assorbimento a ciclo chiuso a pressione atmosferica con utilizzo di MEA 5 M e di una corrente di N₂ e CO₂ con 15% in volume di CO₂;
- prova per verificare la possibilità di esercire il sistema in condizioni di quasi isotermità al fine di raccogliere i dati sperimentali necessari per lo studio sulle correlazioni densità - caricamento e pH - caricamento del solvente. In particolare è stato condotto un test di assorbimento a ciclo chiuso a pressione atmosferica con utilizzo di MEA 5 M e di una corrente di N₂ e CO₂ con 15 % in volume di CO₂;
- prove di saturazione con MEA 5M con una corrente gassosa composta da azoto all'85% e CO₂ al 15% (in volume);
- prova di assorbimento con MEA 3M con una corrente gassosa composta da azoto all'85% e CO₂ al 15% (in volume) (Figura 252).

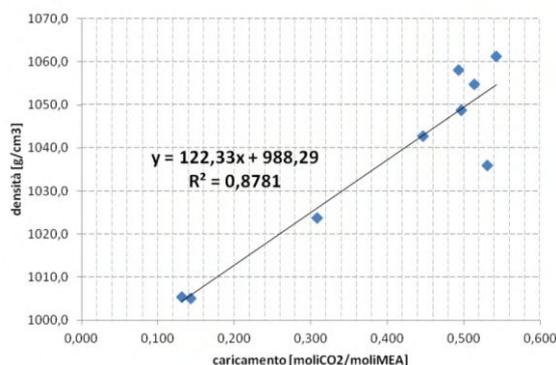


Figura 252. Variazioni densità vs. caricamento - soluzione acquosa di MEA 3M

- prova di saturazione con MEA 7M con una corrente gassosa composta da azoto all'85% e CO₂ al 15% (in volume)
- prova di saturazione con MEA 5M con una corrente gassosa composta da azoto al 70% e CO₂ al 30% (in volume).

Sono state, inoltre, effettuate attività di analisi sui solventi utilizzati durante la campagna di prove. In particolare sono state eseguite analisi riguardanti: titolazione; determinazione della densità e determinazione del pH (Figura 253).

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/197.

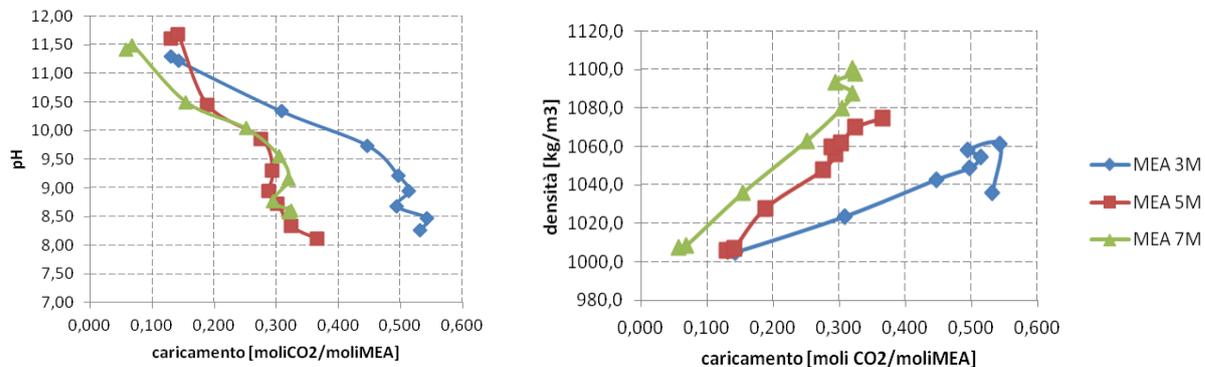


Figura 253. Andamento del pH e della densità in funzione del caricamento (mol_{CO2}/mol_{MEA})

Attività di caratterizzazione dei sistemi di campionamento e analisi di solidi, liquidi e gas

Sono state sviluppate e applicate procedure analitiche per la caratterizzazione di solidi, liquidi e gas. In particolare si è provveduto alla caratterizzazione di:

- solidi (combustibili quali carboni e/o biomasse utilizzati nel reattore di gassificazione dell'impianto, scarichi (ceneri e combustibile non reagito) del suddetto gassificatore;
- liquidi (soluzioni acquose di ammine utilizzate per l'assorbimento dell'anidride carbonica);
- gas (campionamento e analisi del syngas e di miscele gassose sia tramite sistemi continui che discontinui).

Nel rapporto RdS/2013/198 sono illustrati, per ciascuna attività di caratterizzazione, oltre alle apparecchiature impiegate, i metodi analitici utilizzati, gli aspetti critici legati a ciascuna procedura di analisi e gli eventuali sviluppi e miglioramenti che possono essere condotti o sviluppati per l'ottenimento di una caratterizzazione la più precisa e puntuale possibile.

Analisi dei risultati dei test sperimentali

Sono stati analizzati i risultati dei test sperimentali svolti sulle unità di assorbimento e sull'unità di rigenerazione dei solventi a base di ammine dell'impianto pilota Sotacarbo.

Gli obiettivi della campagna sperimentale, sono stati:

- ottimizzare il funzionamento della unità di rigenerazione installata nel 2011;
- mettere a punto le procedure operative per la conduzione dei test sperimentali di assorbimento della CO₂ e rigenerazione dei solventi amminici in continuo a ciclo chiuso; a tale fine è stato studiato il funzionamento dell'unità di separazione della CO₂ e di rigenerazione dei solventi in ciclo continuo sia utilizzando una miscela di gas da bombole costituita da CO₂ e N₂ con composizione simile ad un syngas uscente da un reattore di CO-Shift, sia utilizzando il syngas, opportunamente trattato (abbattimento polveri e tar e desolfurazione), proveniente dal gassificatore;
- valutare ed ottimizzare i principali parametri di processo (ad esempio energia richiesta per la rigenerazione, efficienza di rimozione della CO₂ in relazione anche al grado di decadimento delle prestazioni dell'ammina al variare del numero di cicli di assorbimento-rigenerazione);
- valutazione del funzionamento della linea a caldo: desolfurazione a caldo, reattori a bolle a circuito chiuso con l'unità di rigenerazione.

Al fine di eseguire i test sperimentali nell'impianto pilota è stata necessaria la modifica del sistema di distribuzione della miscela gassosa e la modifica del sistema di circolazione delle ammine tra l'unità di separazione della CO₂ e l'unità di rigenerazione. Le modifiche hanno permesso di effettuare test sperimentali di assorbimento/rigenerazione con più cicli, così da avvicinare quanto più possibile il funzionamento delle due unità a quello degli impianti di scala dimostrativa-industriale.

Nello specifico si riporta quanto emerso dalle prove sperimentali di assorbimento/rigenerazione, dove l'assorbimento dell'anidride carbonica è avvenuto in due reattori a bolle nella linea di trattamento "a caldo" del syngas, con monoetanolamina 5M.

I due reattori a bolle della linea di trattamento "a caldo" del syngas sono stati alimentati, nel corso di due differenti prove sperimentali, con syngas da CO-shift simulato mediante miscele bicomponente di N₂ e CO₂ stoccati in bombole, e con syngas (generato dal gassificatore) proveniente dai reattori di desolforazione a caldo. Tale sistema ha presentato un'efficienza media di rimozione della CO₂ nel caso di gas da bombole pari al 50÷55%, nel caso di syngas pari al 80÷85%.

I principali obiettivi raggiunti sono:

- ottimizzazione della portata di CO₂ desorbita;
- ottimizzazione dell'energia assorbita per la rigenerazione attraverso il miglioramento della gestione della unità di rigenerazione;
- verifica della variazione dell'efficienza di assorbimento al variare della configurazione impiantistica;
- ottimizzazione della temperatura operativa al ribollitore della colonna di rigenerazione.

I principali obiettivi futuri sono:

- simulazione di un syngas proveniente dal processo di CO-shift come miscele multicomponente di gas al fine di studiare la degradazione chimica del solvente;
- ottimizzazione dell'energia richiesta per la rigenerazione del solvente al variare delle condizioni operative della rigenerazione;
- aumento del numero di cicli di assorbimento/rigenerazione al fine di poter valutare la degradazione dell'ammina;
- miglioramento dell'efficienza di assorbimento della CO₂ nei reattori a bolle tramite delle modifiche sugli stessi.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/197.

a.3 Analisi dinamica e controllo di impianti CCS post-combustione

L'applicazione di un sistema CCS operante in post-combustione su un impianto avanzato, tipicamente USC, presenta indubbe problematiche di regolazione nel caso di modulazione del carico. L'attività dell'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, riguardante la modellazione e il controllo di un impianto di tipologia CCS Post-Combustione, dimensionato per trattare la portata di fumi uscente da una centrale di potenza USC (Ultra Super Critical) di taglia 250 MWe (Benchmark), si è focalizzata sul miglioramento del modello dell'impianto, con particolare riguardo all'assorbitore e allo stripper, nonché alla progettazione di un sensore software per la stima della CO₂ uscente dai gas trattati.

In particolare, visti i diversi approcci modellistici pubblicati in letteratura, è stata condotta, in un primo momento, un'analisi sull'effetto del numero di stadi con cui viene descritto il processo. Infatti, sia l'assorbitore sia lo stripper, sono spesso modellati con circa trenta stadi (Oexmann & Kather, 2009) e talvolta solamente dieci (Mores, et al., 2012). Ora, appurata la presenza di forti gradienti in entrambe le unità si è pensato di analizzare più attentamente l'effetto che una discretizzazione più "fine" del dominio spaziale potrebbe apportare alla rappresentazione del processo. L'assorbitore e lo stripper, sono stati simulati utilizzando il modello RadFrac™ in modalità RateBased (software AspenPlus®) con un numero di stadi crescente. In Figura 254 e in Figura 254b sono rappresentati gli andamenti dei profili di temperatura lungo l'apparecchiatura dell'assorbitore e dello stripper. L'utilizzo dei profili di temperatura è preferibile a quelli di composizione perché le calibrazioni dei modelli di processi industriali è basata sulla capacità del modello di descrivere questi profili, che spesso sono gli unici noti.

Come si può vedere dalla Figura 254a, i profili ottenuti per l'assorbitore, anche se qualitativamente simili, presentano delle differenze, nonostante le condizioni in uscita siano rimaste invariate. Al fine di selezionare il numero di stadi da utilizzare, compromesso da accuratezza e onerosità di calcolo, è stata valutata la differenza di temperatura ottenuta lungo la colonna utilizzando come riferimento il profilo relativo alla simulazione con 300 stadi (Tabella 62).

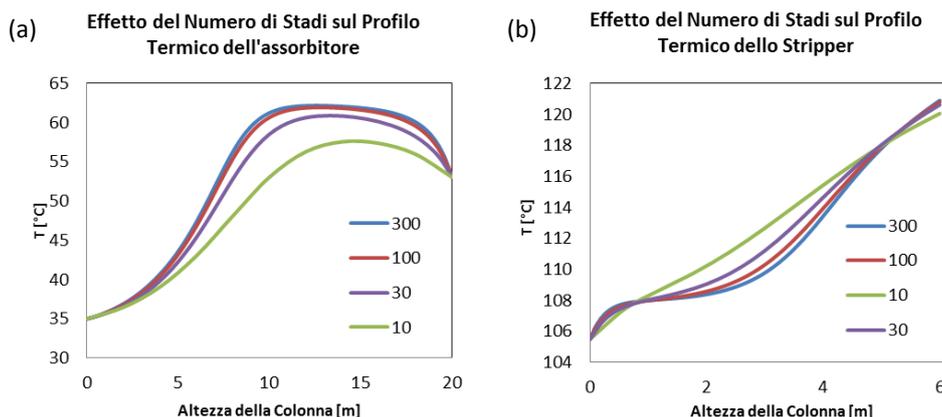


Figura 254. Profilo termico al variare del numero degli stadi: a) assorbitore; b) stripper

Tabella 62. Differenza massima di temperatura tra i vari profili calcolati con diversi numeri di stadi e il profilo a 300 stadi

Numero di Stadi	10	30	50	75	100	120	150	200
ΔT	8,27	3,28	2,05	1,36	0,93	0,77	0,56	0,35

Le stesse considerazioni ottenute per l'assorbitore possono essere dedotte per lo stripper, Figura 254b. Anche in questo è stata valutata la differenza di temperatura ottenuta lungo la colonna utilizzando come riferimento il profilo relativo alla simulazione con 300 stadi così come riportato in Tabella 63.

Tabella 63. Differenza massima di temperatura tra i vari profili calcolati con diversi numeri di stadi e il profilo a 300 stadi

Numero di Stadi	10	30	50	75	100	120	150	200
ΔT	3,00	1,59	0,98	0,65	0,42	0,32	0,22	0,34

Ora, dovendo simulare il comportamento di un processo reale e considerando che il massimo errore di temperatura deve essere inferiore al grado Celsius, possiamo concludere che occorreranno almeno 100 stadi per l'assorbitore e almeno 50 stadi per lo stripper. L'utilizzo di un numero di stadi inferiore a quelli suggeriti, specialmente nelle simulazioni dinamiche del processo, porterà a errori di valutazione anche grossolani.

Una volta definito il numero di stadi effettivo da utilizzare per la modellazione dell'assorbitore e dello stripper, si è sviluppato un modello matematico, basato su principi primi, per le due apparecchiature.

In particolare, il modello è stato messo a punto in base alle seguenti assunzioni:

- modello plug-flow per la descrizione della fluidodinamica della fase liquida e vapore;
- comportamento non-ideale della miscela liquida e gassosa;
- equilibrio termodinamico in corrispondenza dell'interfaccia gas/liquido;
- effetto delle reazioni nel film liquido espresso dal fattore di esaltazione;
- assenza di scambio termico con l'esterno.

Il modello formulato, basato sulla teoria dei due film considera contemporaneamente la fase liquida e la fase gassosa. Nella fase liquida, sia nell'assorbitore sia nello stripper sono stati modellati tutti i componenti eccetto gli inerti (Ar, N_2, O_2) mentre, per quanto riguarda la fase gassosa, nello stripper sono stati considerati solamente i componenti volatili (CO_2, MEA, H_2O) e nell'assorbitore sono state considerate le specie volatili e gli inerti. La chimica del sistema è stata descritta dalle espressioni cinetiche di formazione del carbammato e dell'idrogeno carbonato e dalle relazioni di equilibrio riguardanti la dissociazione dell' H_2O , della MEA e dell'idrogeno carbonato.

Le composizioni all'interfaccia sono state ricavate considerando gli equilibri di fase e l'uguaglianza dei flussi. Inoltre, per calcolare l'effettivo trasferimento di materia attraverso il film liquido, è stato necessario utilizzare il fattore di esaltazione, il quale rappresenta il rapporto tra il flusso in presenza di reazione chimica e il flusso puramente diffusivo. Detto modello è stato implementato sul Custom Modeler di AspenPlus®.

Infine, noto il modello dell'assorbitore, si è iniziata la progettazione di un osservatore per inferire la concentrazione in uscita della CO₂ del gas trattato nell'assorbitore. Tale, osservatore è basato su un modello semplificato dell'assorbitore e come algoritmo di correzione sarà utilizzato l'Osservatore Geometrico⁸.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/194.

a.4 Analisi dell'integrazione di impianti di cattura post-combustione della CO₂ con fonti rinnovabili

Nel corso della ricerca in oggetto, condotta dall'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, è stato realizzato un ampio e approfondito studio sulla possibilità e convenienza dell'integrazione tra sistemi di cattura della CO₂ da impianti a carbone e impianti solari a concentrazione (CSP). La tecnologia CCS studiata è basata su un sistema di rimozione della CO₂ con un processo di assorbimento chimico con una soluzione acquosa di MEA in integrazione con un impianto a vapore ultrasupercritico (USC), mentre l'impianto CSP è basato su collettori lineari Fresnel.

Lo studio è stato realizzato attraverso una complessa modellistica sviluppata con l'ausilio dei codici commerciali Aspen-Plus e Gate-Cycle per le sezioni USC e CCS, del codice Meteonorm e di codici specificamente sviluppati "in house" per la sezione solare, che ha permesso di quantificare gli effetti dei principali parametri operativi e delle differenti configurazioni adottate sulle prestazioni degli impianti.

L'impianto USC garantisce nella configurazione base prestazioni elevate in termini di rendimento (43,87%), tuttavia nella configurazione integrata con i sistemi di rimozione e compressione della CO₂, è caratterizzato da considerevoli penalizzazioni energetiche, ovviamente crescenti con l'aumentare del grado di rimozione della CO₂. In particolare nel caso di efficienza di rimozione del 50%, il rendimento dell'impianto USC si riduce al 38,4%, valore che scende al 36,0% per un'efficienza di rimozione pari al 70% e fino al 33,5%, nell'ipotesi di efficienza di rimozione del 90%. Le emissioni specifiche di CO₂, che per l'impianto USC di riferimento sono pari a 790 g/kWh, si riducono notevolmente, arrivando a 103 g/kWh, nell'ipotesi di efficienza di rimozione del 90%. Anche nel caso di impianto USC integrato con sistemi CCS con efficienza di rimozione della CO₂ pari al 50% le emissioni dell'impianto si riducono in misura sostanziale (450,9 g/kWh), però si mantengono superiori a quelle dei moderni impianti di produzione elettrica basati su cicli combinati e alimentati a gas naturale (circa 350 g/kWh).

È stata quindi effettuata un'analisi approfondita delle prestazioni del campo solare con riferimento alla zona climatica di Cagliari. Per produrre una potenza termica utile pari a 50 MW in condizioni di progetto (DNI pari a 800 W/m², altezza solare pari a 74,2°, angolo di azimuth pari a zero e temperatura dell'aria ambiente di 30 °C, superfici riflettenti perfettamente pulite) è necessario installare circa 20 linee di collettori operanti in parallelo, di lunghezza e larghezza pari a circa 450 e 16,5 m rispettivamente, con una occupazione di spazio a terra dell'ordine di circa 200000 m². La potenza complessivamente prodotta dal campo solare aumenta ovviamente in funzione del numero di linee installate. L'analisi effettuata mostra come il campo solare di riferimento (20 linee) è in grado di operare per circa 3500 ore/anno, con una produzione di energia termica pari a circa 72 GWh. Emerge anche come il campo solare operi con una produzione di vapore maggiore o uguale a quella di progetto solo per poche ore all'anno (circa 115 ore), mentre nella maggior parte dei casi opera in condizioni di minore portata. Il rendimento netto del campo solare su base annua risulta essere pari a circa il 40,6%.

Infine nell'ultima parte della ricerca sono stati valutati gli effetti dell'integrazione tra il campo solare e la sezione CCS dell'impianto USC. L'integrazione con il solare permette di produrre parzialmente o completamente (in relazione alle dimensioni del campo solare), l'energia richiesta per la rigenerazione del solvente e di ridurre la portata di vapore spillata allo scopo dalla turbina di bassa pressione, con conseguente beneficio per le prestazioni dell'impianto USC. Tuttavia nelle ore di funzionamento dell'impianto USC in integrazione con il solare, cioè quando la sezione CCS è alimentata completamente o in parte con vapore prodotto dal campo solare, l'impianto USC opera in condizioni di "off-design" con conseguente penalizzazione delle prestazioni. Dall'analisi emerge pertanto come non sia possibile sfruttare completamente le potenzialità dell'energia solare e come la penalizzazioni aumentino all'aumentare del grado di rimozione della CO₂, perché l'impianto USC si discosta sempre maggiormente dalle condizioni di progetto.

L'integrazione con il solare permette un incremento dell'energia elettrica prodotta dall'impianto USC pari, su base annua, a circa l'1%, con un incremento di rendimento che può raggiungere al più 0,5 punti percentuali. Valori più elevati si ottengono nei mesi estivi, caratterizzati da una maggiore radiazione incidente, nei quali l'incremento percentuale di energia prodotta si avvicina anche al 2%, con rendimenti di conversione dell'energia solare in energia elettrica anche pari al 9%, mentre la media annuale non supera il 7% per un campo solare integrato con un sistema CCS con efficienza di rimozione pari al 50%.

⁸ J. Alvarez, «Nonlinear state estimation with robust convergence,» *Journal of Process Control*, vol. 10, pp. 59-71, 2000

Nonostante i relativamente bassi costi dei collettori Fresnel che assicurano contenuti costi marginali dell'energia elettrica prodotta da fonte solare, i costi di produzione dell'energia elettrica degli impianti USC con rimozione della CO₂ integrati con collettori a concentrazione tendono ad aumentare. L'analisi economica preliminare condotta in conclusione della presente ricerca mostra, infatti, come l'impianto USC di base abbia un costo di produzione dell'energia elettrica pari a 4,75 c€/kWh, valore che con l'integrazione con la sezione CCS cresce a 7-8 c€/kWh (funzione della efficienza di rimozione della CO₂). Considerando un costo attuale di un campo solare basato su collettori Fresnel nell'intervallo 150-200 €/m², il costo totale di produzione dell'energia cresce di circa l'1,8-2,7%, con costi marginali di produzione dell'energia elettrica da fonte solare che risultano compresi tra 12,5 e 26 c€/kWh. Nell'ipotesi speculativa di una forte riduzione del costo dei collettori nei prossimi anni fino a 100 €/m² i costi marginali di produzione dell'energia elettrica da fonte solare scendono fino a 8,5-13 c€/kWh (in funzione della efficienza di rimozione della CO₂), valori solo di poco superiori al costo di produzione dell'energia elettrica da impianti USC integrati con sezione CCS. Pertanto, solamente nel caso di forti riduzioni di costo dei collettori solari (almeno del 60-65% rispetto agli attuali) l'impiego del solare a concentrazione per la produzione di vapore da utilizzare per la rigenerazione del solvente nei processi di cattura della CO₂ prodotta da impianti USC appare economicamente conveniente.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/195.

b. Tecnologie per la cattura della CO₂ in pre-combustione attraverso la produzione e il trattamento di combustibili gassosi e liquidi dal carbone

Per quanto riguarda le tecnologie di cattura pre-combustione comportando generalmente il passaggio attraverso una fase di pre-trattamento del combustibile (gassificazione e clean-up), vedono l'attività articolarsi in tre Sub-Task :

- b.1 Ottimizzazione del processo di gassificazione (diagnostica, controllo, gas-cleaning). Trattamento e conversione del syngas. Sviluppo di un innovativo processo di piro-gassificazione.
- b.2 Produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS
- b.3 Cattura della CO₂ con sorbenti solidi.

b.1 Ottimizzazione del processo di gassificazione (diagnostica, controllo, gas-cleaning). Trattamento e conversione del syngas. Sviluppo di un innovativo processo di piro-gassificazione

Il sub task è relativo alla ottimizzazione della tecnologia nota di gassificazione, al trattamento e conversione del syngas, e al parallelo sviluppo di un innovativo processo di pirolisi e gassificazione separate.

Ottimizzazione del processo di gassificazione

L'esperienza maturata durante le campagne sperimentali svolte nel corso delle precedenti annualità ha consentito la modifica ed il miglioramento di attrezzature ed impianti che, a partire dalla gassificazione del carbone, consentono di produrre energia elettrica e/o syngas ad alto tenore di idrogeno o metano.

Conseguentemente anche in questa annualità lo sviluppo delle attività sulla gassificazione del carbone, e sul trattamento del syngas effluente, sono proseguite sia presso il Centro Ricerche ENEA di Casaccia sia presso Sotacarbo ed in particolare sulla Piattaforma Sperimentale di Produzione di Energia Elettrica ed Idrogeno da Carbone (Impianto Pilota). Sono state eseguite oltre 200 ore di sperimentazione a caldo, sono stati progettati e realizzati nuovi sistemi ed impianti, nella prosecuzione della strategia di approfondimento degli studi sulla conversione termochimica del carbone.

Ottimizzazione del processo di gassificazione: upgrade impianto GESSYCA

Sono proseguite, da parte di ENEA, le attività di progettazione e realizzazione delle modifiche all'impianto GESSYCA (GEnereatore Sperimentale di SYngas da CARbone) presso C.R. ENEA Casaccia. In particolare è stata realizzata una sezione integrata di cleanup, desolfurazione e trattamento del gas di sintesi orientato alla produzione di SNG. Altresì si è proceduto con l'installazione di componentistica ausiliaria utile per il funzionamento dell'impianto che risulta, ad oggi, essere installato su una piattaforma di dimensioni assimilabili ad un container movimentabile ed eventualmente trasportabile su camion (Figura 255).



Figura 255. Impianto GESSICA: installazione e vista di insieme della nuova sezione di clean up

Si ricorda che l'impianto GESSYCA è realizzato per la messa a punto di sistemi innovativi, strumentazione diagnostica, metodologie di controllo afferenti al tema gassificazione.

Sono proseguite le attività di coordinamento e collaborazione alla sperimentazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo. In particolare si è dato corso al consolidamento delle attività di monitoraggio del processo di gassificazione procedendo alla modifica ed al completamento di un sistema dedicato per la misura della temperatura di parte del reattore di gassificazione basato su una serie di termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica.

Altresì è stata integrata la misura della temperatura del sotto griglia con modifiche alla geometria del sistema che in prima istanza fornisce informazioni utili:

- a segnalare, a seconda delle diverse fasi di funzionamento (avviamento, regime, spegnimento) la presenza di anomalie nella distribuzione di temperatura sia lungo le direttrici verticali che radiale (Figura 256);



Figura 256. Monitoraggio termico del gassificatore della Piattaforma Pilota: disposizione dei sensori TC e quadro di acquisizione, particolari delle installazioni

- a prevenire effetti di agglomerazione principalmente dovuti alla fusione delle ceneri e danneggiamenti del refrattario, della griglia e di organi interni eventualmente presenti quali stirrer e sensoristica interna al reattore come quella relativa a livello e temperatura;
- a dare una misura qualitativa della reattività interna dei diversi tipi di carbone e combustibili processati;
- alla regolazione ed al controllo del processo in continuo.

L'obiettivo finale dichiarato è quello di migliorare la gestione del processo di gassificazione pervenendo ad un sistema automatico di carico del carbone, scarico delle ceneri, modulazione dei reagenti gassosi nell'ottica di ottenere un funzionamento stabile ed efficiente. Il sistema abbisogna ancora di essere migliorato, specie sul lungo periodo, dal punto di vista della resistenza delle sonde poste in ambienti fortemente aggressivi dal punto di vista meccanico, chimico e termico.

E' stato possibile di fatto eliminare la presenza della termocoppia multipla interna e della barra di misurazione di livello andando ad eliminare così la principale causa della formazione di camini preferenziali lungo il letto di gassificazione (channeling). Tale fenomeno porta inevitabilmente ad un abbattimento delle prestazioni del sistema che diventa di fatto non controllabile costringendo il più delle volte a non procrastinabili fermate d'impianto.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/199.

Modifiche e migliorie degli impianti

Nell'ambito della presente Azione sono state modificate e integrate, a cura di Sotacarbo, parti importanti dell'impianto Pilota. Gli interventi operati vengono di seguito descritti.

Studio e risoluzione delle problematiche di pressione dell'impianto

Per risolvere il problema delle sovrappressioni, riscontrato nelle precedenti sperimentazioni, è stata studiata una soluzione che prevede la costruzione di una nuova linea di invio del syngas alla torcia con l'inserimento, in parallelo, di due valvole rompifiamma.

Con la realizzazione di tale modifica è stato possibile ottenere anche i seguenti vantaggi:

- riduzione delle perdite di carico dovuta alla ripartizione del flusso di syngas lungo due linee di adduzione;
- possibilità di effettuare la manutenzione della valvola rompifiamma durante il funzionamento dell'impianto senza dover interrompere il flusso di syngas alla torcia.

Tale modifica ha consentito di attenuare il fenomeno delle sovrappressioni dovuto essenzialmente allo sporcamento delle valvole rompifiamma. Durante le prove eseguite successivamente a tale modifica sono stati registrati valori di pressione intorno ai 60÷70 mbar (inferiori rispetto ai valori registrati prima di tale modifica).

Modifiche e migliorie al gassificatore

Durante le campagne sperimentali precedenti sono state rilevate delle difficoltà durante la fase di scarico delle ceneri dovute a frequenti impaccamenti del letto di gassificazione, per tale motivo sono stati realizzati dei sistemi manuali di rottura degli agglomerati del letto di gassificazione per permetterne la sua movimentazione, evitandone in questo modo l'impaccamento.

Modifiche alle sezioni di assorbimento e rigenerazione della CO₂ dell'impianto pilota

Rispetto alla configurazione di impianto relativa alle attività svolte nella precedente annualità, sono state effettuate delle modifiche per poter eseguire test di assorbimento e rigenerazione della CO₂ a ciclo chiuso. Le modifiche effettuate permettono di inviare la miscela del gas, che simula un gas da combustione o un syngas da gassificazione, direttamente all'ingresso del reattore di assorbimento della CO₂, collegato in ciclo chiuso con la colonna di rigenerazione.

Miglioramento della strumentazione esistente

Al fine di ottimizzare il funzionamento delle sezioni dell'impianto pilota si è deciso di migliorare la strumentazione esistente. Sono state inoltre condotte ulteriori attività di modifica e manutenzione di impianto che hanno riguardato in particolare:

- la manutenzione del sistema di accensione del gassificatore;
- lo smontaggio del cono del gassificatore e la manutenzione della griglia di scarico ceneri, con riparazione del sistema di movimentazione della stessa;
- la manutenzione del refrattario del gassificatore;
- la manutenzione dello scrubber e del primo stadio di desolfurazione a freddo;
- lo smontaggio del misuratore di livello per la sua manutenzione;
- la verifica della funzionalità delle ghigliottine del sistema di scarico ceneri e loro manutenzione;
- l'inserimento di sistemi per la misurazione delle pressioni a monte e a valle delle seguenti apparecchiature: gassificatore; scrubber; I stadio di desolfurazione a freddo; II stadio di desolfurazione a freddo; valvola rompifiamma;
- il convogliamento degli scarichi provenienti dai sistemi di campionamento e analisi gas (micro gascromatografo sistema ABB) in zona sicura a valle della valvola rompifiamma.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/196.

Sperimentazione del processo di gassificazione

Nel corso della campagna sperimentale oggetto del presente programma SOTACARBO, particolare attenzione è stata rivolta allo studio di miscele di carbone russo e carbone Sulcis, sia alla co-gassificazione di carbone e biomasse.

Sono stati eseguiti test sperimentali sull'impianto pilota per valutare:

- l'efficienza del processo di gassificazione utilizzando una miscela di carbone russo e di carbone Sulcis a granulometria controllata;
- il grado di conversione e la reattività del combustibile.

Tali parametri sono stati confrontati con quanto ottenuto nelle precedenti prove di gassificazione effettuate con carboni differenti. È stato inoltre valutato il processo di desolforazione a freddo con l'utilizzo soda. I componenti d'impianto testati sono stati: *gassificatore, scrubber, I stadio di desolforazione a freddo con soda, torcia e motore a combustione interna*.

Il combustibile utilizzato è stato: 80% carbone russo e 20% Sulcis, aventi pezzatura compresa tra 8 e 12 mm.

Sono state effettuate poi due sperimentazioni, con le medesime finalità ma utilizzando come combustibile: 60% carbone russo - 40% biomassa e 50% carbone Sulcis - 50% biomassa (Figure 257 e 258), pezzatura compresa tra 8 e 12 mm.

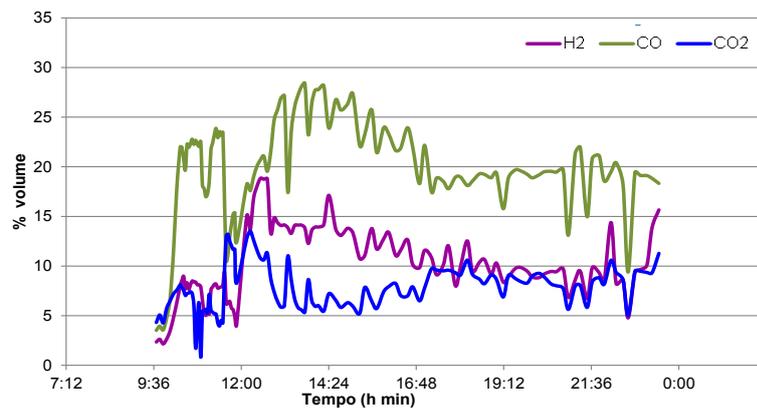


Figura 257. Co-gassificazione Sulcis – cippato di legno: composizione del syngas prodotto

La durata complessiva delle sperimentazioni eseguite al 30 settembre 2013 è stata pari a circa 130 ore.

Relativamente alle miscele di carbone russo e carbone Sulcis, è stato ampiamente confermato che il carbone russo, di per se poco reattivo e non adatto, da solo, all'impiego in un gassificatore in letto fisso *up-draft*, ha fornito prestazioni nettamente migliori se miscelato con almeno il 20% di carbone Sulcis, notevolmente più reattivo.

Altresì, la gassificazione di miscele di carbone e biomasse ha dato risultati estremamente interessanti, se pur ancora parziali (il processo richiede una ulteriore ottimizzazione).

Nel corso della campagna sperimentale è stato effettuato un test di lunga durata (circa 36 ore) impiegante miscele di carbone e biomasse. Rispetto ai test effettuati nelle precedenti campagne ma impieganti esclusivamente carbone, è risultato che l'impiego delle biomasse nella miscela alimentata al gassificatore consente un migliore controllo delle temperature, che in passato è sempre risultato piuttosto complesso soprattutto nell'ultima parte dei test.

Dall'analisi delle prestazioni di gassificazione riscontrate con vari combustibili testati, emerge come la lignite proveniente dall'Alaska (Usibelli Coal Mine) abbia ad oggi presentato le migliori prestazioni in termini di potenzialità del processo, principalmente grazie alla sua elevata reattività.

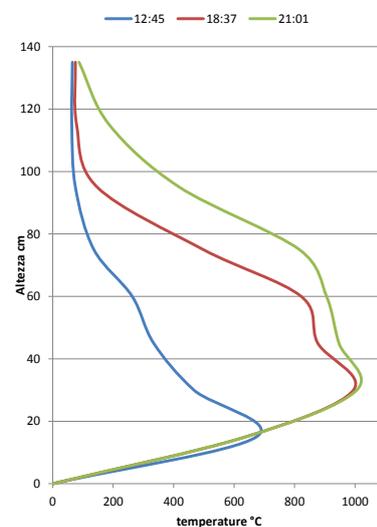


Figura 258. Co-gassificazione Sulcis - cippato di legno: profili termici

A seguito dei risultati ottenuti, sono state infine evidenziate le principali linee guida per la pianificazione delle successive campagne sperimentali. Esse dovranno essere volte principalmente al miglioramento della stabilità del processo, all'integrazione della strumentazione e alla predisposizione di procedure standardizzate che rendano sempre più significativo il confronto tra i risultati ottenuti dalla gassificazione di differenti combustibili. Infine, alle sperimentazioni su scala pilota potranno essere affiancati test di caratterizzazione dei combustibili, da effettuarsi in laboratorio, al fine di individuare i parametri operativi ottimali.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/204.

Caratterizzazione di campioni di carboni, biomasse per applicazioni di generazione di energia elettrica

Nell'ambito di questa azione sono state svolte da Sotacarbo attività di caratterizzazione di carboni e biomasse. Per quel che concerne il carbone, sono stati individuati carboni di basso rango disponibili in Europa.

Per quanto riguarda le biomasse, sono state individuate le diverse tipologie, attualmente reperibili in Sardegna, più idonee ad essere utilizzate nei processi di gassificazione. Non appena, disponibili, i campioni potranno essere analizzati presso laboratori Sotacarbo.

In generale le biomasse disponibili sono rappresentate da biomassa agro-forestale, ossia residui generati da operazioni di manutenzione del patrimonio boschivo; biomassa agricola, costituita sia da residui di lavorazioni agroalimentari e risultanti dell'industria zootecnica, sia da colture dedicate.

Essendo le biomasse caratterizzate da una distribuzione assai disomogenea sul territorio, per poter reperire dei campioni, si è provveduto a contattare diverse istituzioni quali: Università di Cagliari (Dipartimento di Ingegneria Meccanica), Università di Sassari (Dipartimento di Scienze della Natura e del Territorio), Regione Sardegna (Assessorati Ambiente, Agricoltura, Industria), Agris (agenzia della Regione Sardegna per la ricerca scientifica, la sperimentazione e l'innovazione tecnologica nei settori agricolo, agroindustriale e forestale), Sardegna Ricerche, Ente Foreste Sardegna. Sono state inoltre contattate direttamente le realtà produttive attive sul territorio, quali piccoli impianti di produzione elettrica eserciti a biomasse, i Consorzi Industriali e i Consorzi Agrari.

Dai contatti presi si è stilato un quadro di quali siano le colture energetiche dedicate più idonee al territorio dell'isola e di conseguenza più rappresentate: per le colture di campo: insilato e trinciato di mais, triticale, sorgo foraggero, per le colture oleaginose: colza e brassica carinata, per le forestazioni a rapido accrescimento, essenzialmente pino ed eucaliptus. Per quanto riguarda la biomassa da manutenzione forestale, le essenze più frequenti sono leccio, pioppo, sughera, olivastro, per le specie arboree e lentischio, corbezzolo e canna comune per gli arbusti.

Sono stati caratterizzati i diversi campioni di carbone e biomasse le cui analisi sono state riportate nel rapporto RdS/2013/206.

Ottimizzazione dei processi di cattura in pre-combustione

L'Impianto Pilota di SOTACARBO è munito di reattori a bolle, utilizzabili per lo studio del processo di separazione della CO₂ dal syngas. Al fine di rendere tali reattori più adatti allo svolgimento delle sperimentazioni, sono state apportate modifiche al sistema di distribuzione e di ricircolo della solvente amminico. Inoltre la sezione di assorbimento e di rigenerazione sono state collegate in modo da poter effettuare le prove a ciclo chiuso in continuo.

Sono state utilizzate due differenti configurazioni:

- Sezione di assorbimento costituita da un solo reattore a bolle

In Figura 259 è riportato uno schema semplificato della sezione di assorbimento e rigenerazione a ciclo chiuso in continuo. Il circuito della soluzione amminica esausta è stato collegato al sistema di rigenerazione per poter operare in continuo. L'alimentazione di MEA saturo al sistema di rigenerazione avviene con l'ausilio della pompa di

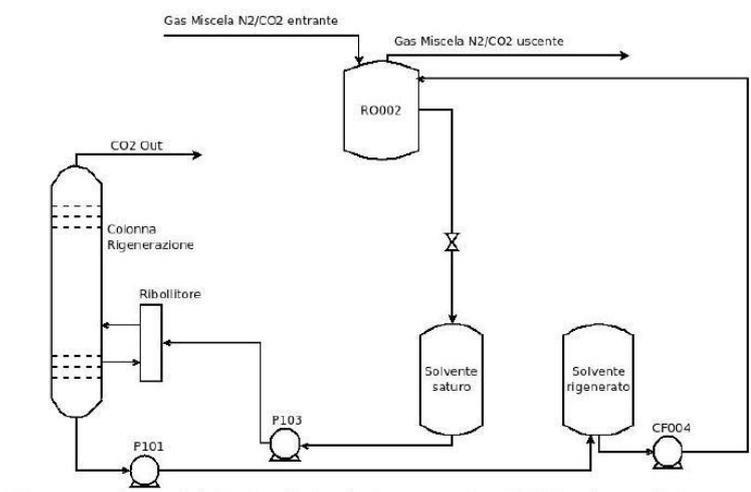


Figura 259. Impianto Piattaforma Pilota: schema disposizione sensori TC e quadro recentemente installato

aspirazione P103 tramite la linea di prelievo del solvente dal reattore a bolle, indicato in figura RO002, fornita di valvola di non ritorno. La soluzione saturo viene alimentata nel ribollitore e prelevata dal fondo della colonna dove avviene il desorbimento. La soluzione amminica viene poi inviata tramite la pompa P101 al serbatoio di solvente rigenerato ed infine tramite la pompa CF004 reimpressa nell'assorbitore. La CO₂ desorbita viene spurgata in atmosfera in testa alla colonna di rigenerazione. I serbatoi di accumulo della soluzione amminica a monte e a valle del reattore hanno la funzione di polmone in modo da garantire all'interno del reattore assorbitore RO002 il livello costante (350-370 mm).

La composizione della miscela entrante e uscente dall'assorbitore è misurata dal gas cromatografo che campiona il gas immediatamente a monte e a valle del reattore stesso.

- Sezione di assorbimento costituita da due reattori a bolle disposti in serie lato liquido e controcorrente con la miscela gassosa

In tale configurazione (Figura 260), la miscela gassosa, in uscita dal reattore a bolle RO002, viene inviata a un secondo reattore a bolle RO001. Viceversa, la soluzione di ammine in uscita dal reattore a bolle RO001 confluisce tramite una valvola in un serbatoio di accumulo, da cui tramite un'apposita pompa (CF004) viene impiegata per il reintegro del reattore RO002. Liquido e gas fluiscono dunque in controcorrente.

La soluzione amminica uscente dal reattore a bolle RO002 confluisce al serbatoio di solvente saturo che alimenta la colonna di stripping; infine la soluzione di ammina rigenerata viene inviata, tramite la pompa CF005, al reattore RO001.

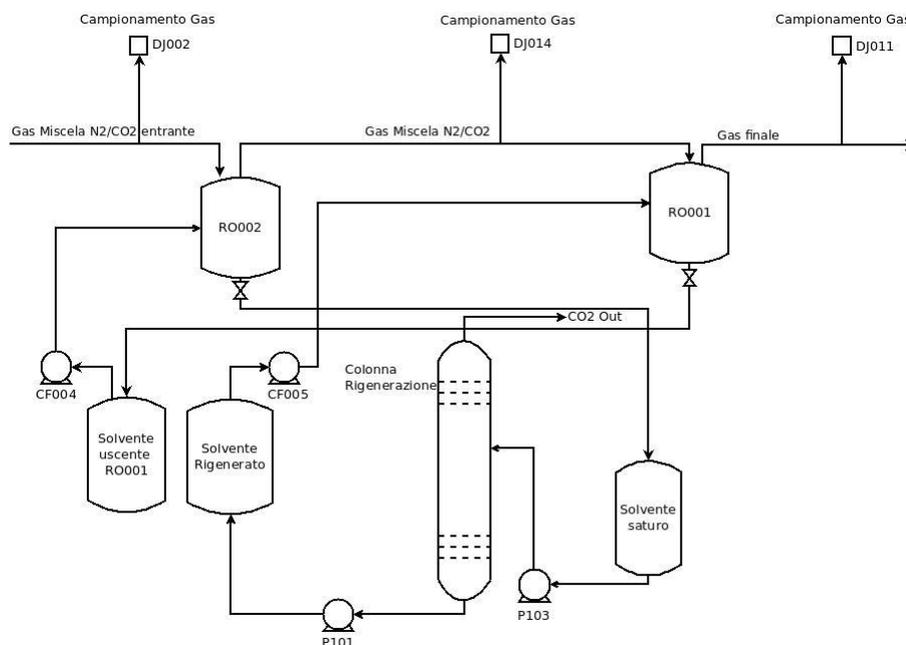


Figura 260. Schema assorbimento CO₂ e rigenerazione

Per quanto riguarda il circuito del liquido, i due reattori, RO001 e RO002, sono stati collegati in serie e alimentati rispettivamente con una soluzione amminica rigenerata e con una soluzione a basso caricamento di CO₂. La disposizione in serie lato liquido, controcorrente con i gas, consente di ottimizzare la capacità di assorbimento della soluzione amminica sfruttando la maggiore forza motrice del processo determinata dalla differenza di concentrazione della CO₂ nella miscela gassosa

Considerazioni generali sui test di separazione della CO₂ e rigenerazione dei solventi amminici

Il principale obiettivo della campagna sperimentale sulla rimozione della CO₂ da syngas proveniente dal processo di CO-shift, simulato tramite una miscela bicomponente composta da CO₂ e N₂, stoccati in bombole, nella percentuale del 30 e 70% rispettivamente, e da syngas proveniente da gassificazione, è stato quello di valutare le prestazioni delle sezioni di assorbimento dell'anidride carbonica e di rigenerazione dei solventi a base di ammine. Nello specifico per le prove effettuate sono state valutate le prestazioni della sezione di assorbimento della CO₂ utilizzando MEA 5M fresca o MEA rigenerata con diversi carichi iniziali ($\text{moli}_{\text{CO}_2}/\text{moli}_{\text{MEA}}$) ad ogni ciclo, ed effettuando test di assorbimento in continuo a ciclo chiuso con la sezione di rigenerazione del solvente. Rispetto

alle prove analoghe della precedente annualità di ricerca, è stato valutato il dispendio energetico necessario al processo di rigenerazione.

Sono stati condotti numerosi test sperimentali nella configurazione ad un singolo reattore a bolle (Figura 261) ed altri nella configurazione a due (Figura 263). La figura seguente si riferisce ad un test condotto con un singolo reattore.

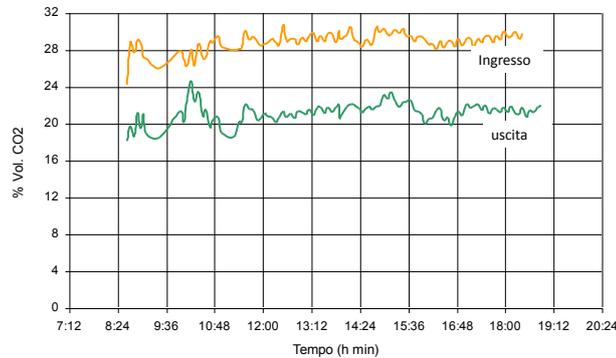


Figura 261. Andamento della concentrazione di CO₂ in ingresso e in uscita dal singolo assorbitore

Sono stati poi valutati i consumi globali di energia da parte del ribollitore della colonna di rigenerazione e dal sistema di preriscaldamento delle ammine, da questo è stata calcolata la potenza media assorbita durante la sperimentazione (Figura 262).

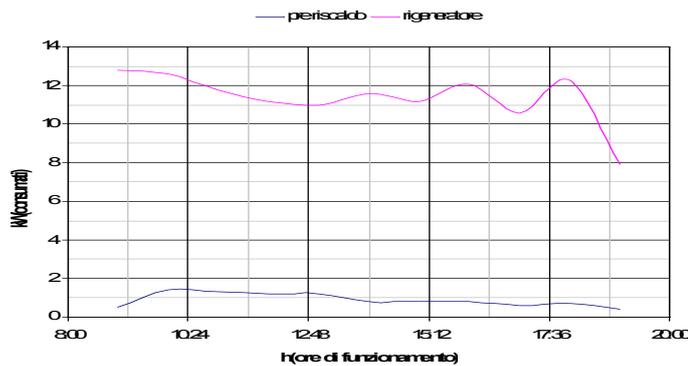


Figura 262. Consumi elettrici dell'unità di rigenerazione e del sistema di preriscaldamento delle ammine

Nel caso di doppio reattore, il grafico di Figura 263 riporta le concentrazioni volumetriche della CO₂ in ingresso al sistema di assorbimento (ovvero in uscita dal sistema di desolfurazione a caldo DJ008) e in uscita da ciascuno dei due assorbitori; esse si mantengono tipicamente stabili per tutto il periodo del test sperimentale. Il rapporto L/G (kg_{solvente}/kg_{gas}) è circa 4 per ogni ciclo. L'efficienza di abbattimento nei vari cicli si mantiene all'incirca costante a valori dell'80-84%.

Dalla costanza della concentrazione di CO₂ nella miscela in uscita degli assorbitori e dell'efficienza di abbattimento nei tre cicli si evince che non si è avuto alcun apparente decadimento delle prestazioni dell'ammina.

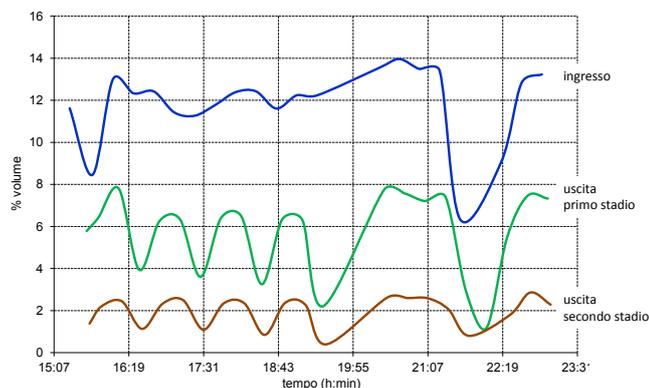


Figura 263. Andamento della concentrazione di CO₂ in ingresso e in uscita da ciascuno stadio di assorbimento

Anche in questo caso, sono stati valutati i consumi globali di energia da parte del ribollitore della colonna di rigenerazione e dal sistema di preriscaldamento delle ammine; da questo è stata calcolata la potenza media assorbita durante la sperimentazione, di cui si riporta il seguente grafico (Figura 264)

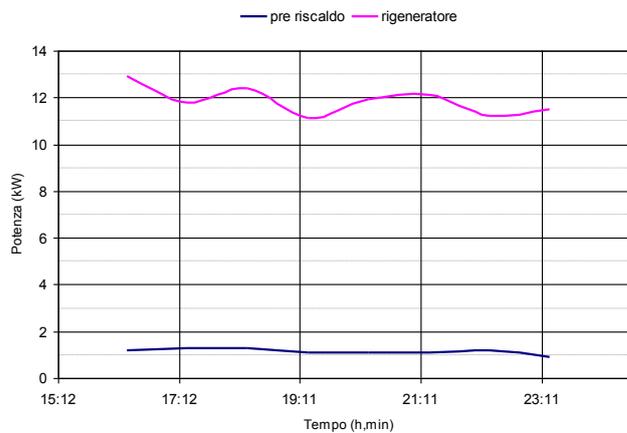


Figura 264. Consumi elettrici dell'unità di rigenerazione e del sistema di preriscaldamento delle ammine

Analisi complessiva del processo di separazione della CO₂

Di seguito si riportano alcune considerazioni di sintesi derivanti dalle analisi dei dati sperimentali. In Tabella 64 sono riportati una sintesi dei dati relativi al processo di separazione della CO₂ nei vari test eseguiti durante l'intera la campagna sperimentale.

Tabella 64. Confronto tra le prestazioni riscontrate nelle prove di assorbimento

Test	18.04.2013	30.05.2013	06.06.2013	20.06.2013
Configurazione	RO002	RO002/RO001 serie controcorrente	RO002/RO001 serie controcorrente	RO002/RO001 serie controcorrente
Portata miscela gassosa (kg/h)	23	20	23	20
Concentrazione iniziale di CO ₂ (% in vol.)	30	15	30	16
Solvente	MEA	MEA	MEA	MEA
Portata ammina dm ³ /h	85	85	85	85
Rapporto medio L/G	3,5	4	3,5	4
Numero cicli	3	3	3	3
Durata di un ciclo (min)	180	180	180	180
Efficienza media rimozione al primo stadio	27%	51%	13%	51%
Efficienza media rimozione al secondo stadio		68%	28%	69%
Efficienza media rimozione totale	27%	84%	37%	86%

Considerazioni sull'influenza della configurazione impiantistica sull'efficienza di separazione

L'efficienza di separazione della CO₂ nel caso in cui si utilizzi un solo reattore a bolle è pari al 27%. Tale valore risulta essere molto basso se confrontato con le prestazioni di altre apparecchiature di assorbimento o con le prestazioni previste per tale apparecchiatura, anche se è da rilevare che la concentrazione della CO₂ è elevata, pari al 30%. L'efficienza così bassa è da imputare principalmente all'eliminazione dei filtri ceramici presenti nei diffusori; questo ha comportato una superficie delle singole bolle maggiore che in precedenza, a fronte di una forte diminuzione del loro numero; in altri termini è diminuita drasticamente la superficie specifica di reazione che ha una forte influenza sull'efficienza di assorbimento. Si ricorda che l'eliminazione dei filtri ceramici è stata necessaria per ridurre le perdite di carico nel sistema.

Nelle configurazioni che utilizzano entrambi i reattori a bolle l'efficienza di separazione aumenta rispetto al caso del reattore singolo, raggiungendo valori prossimi a quelli che potrebbero essere raggiunti utilizzando altre apparecchiature (ad esempio la colonna a riempimento): circa l'84-86%.

In particolare, l'efficienza suddetta è stata ottenuta con una configurazione impiantistica in cui i due reattori sono disposti in serie lato liquido e controcorrente con la miscela gassosa. In tal caso il primo assorbitore è alimentato con ammina rigenerata mentre il secondo è alimentato con una soluzione già carica di anidride carbonica proveniente dal primo reattore. Il gas procede in senso opposto ed entra nel secondo reattore e successivamente nel primo. In tale maniera è stato possibile aumentare il caricamento di CO₂ della soluzione di ammina circolante con una bassa portata di ammina, pari a circa 85 L/h.

Occorre tenere conto inoltre che il numero di cicli che sono stati eseguiti è stato pari a tre e solo nel terzo ciclo sono state raggiunte condizioni stazionarie e significative ai fini delle analisi sperimentali.

Considerazioni sull'influenza della concentrazione di CO₂ sulla efficienza di separazione

Nel corso dei test sperimentali sulla cattura della CO₂ pre-combustione, sono state condotte due tipologie di test variando la concentrazione della CO₂. Questa è stata assunta pari al 30% in volume, simulando un gas in uscita da un processo di CO-shift, e al 10-12% in volume come nel caso del syngas in uscita dal gassificatore (passante prima nelle sezioni di desolforazione e rimozione di polveri e tar). A parità di configurazione impiantistica impiegata, l'efficienza, nel primo caso, è risultata essere meno della metà rispetto al secondo caso: 37 contro 80%. Tale risultato era atteso e rispetta in parte le indicazioni presenti in letteratura anche se dovranno essere eseguiti degli approfondimenti a riguardo.

Considerazioni sul decadimento delle prestazioni dell'ammina al variare del numero di cicli

Essendo stati eseguiti solo pochi cicli nell'ambito di uno stesso test sperimentale, non si può affermare con esattezza nulla sulle prestazioni dell'ammina al variare del numero di cicli.

Dai risultati dei test (efficienze di assorbimento e analisi dei campioni di MEA) sembra emergere che l'ammina non abbia subito un apparente decadimento al variare del numero di cicli. Allo scopo di verificare questa conclusione occorre eseguire ulteriori test con un maggior numero di cicli, eventualmente utilizzando miscele gassose multicomponente, allo scopo di studiare sia il fenomeno del degradamento termico che quello chimico del solvente.

Prestazioni del processo di rigenerazione dei solventi

In Tabella 65 è presentata una sintesi dei dati relativi al processo di rigenerazione del solvente nei vari test eseguiti durante la campagna sperimentale.

Tabella 65. Confronto tra le prestazioni riscontrate nelle prove di rigenerazione

Test	18.04.2013	30.05.2013	06.06.2013	20.06.2013
Portata CO ₂ desorbita (Nm ³ /h)	1,5/2,5	1,5/2	1,5/2,5	1,5/2,5
Portata ammina (dm ³ /h)	85	85	85	85
Set point livello liquido in colonna (mm)	155	155	155	155
Temperatura di regolazione ribollitore (°C)	-	120-122	120-122	120-122
Potenza elettrica preriscaldamento (kW)	1	1	0,5	1
Potenza elettrica ribollitore (kW)	12	12	11	11
Temperatura preriscaldamento ammina (°C)	70	40	40	40
Set point pressione in colonna (mbar)	800	800	800	800
Solvente	MEA	MEA	MEA	MEA
Caricamento MEA (moli CO ₂ /moli MEA)				
MEA 5M - di partenza	0,129	0,161	0,129	0,281
MEA 5M - Campione assorb. (ciclo 1)	0,377	0,306	0,276	0,239
MEA 5M - Campione rigener. (ciclo 1)	0,328	0,231	0,259	0,1
MEA 5M - Campione assorb. (ciclo 2)	0,463	0,391	0,430	0,44
MEA 5M - Campione rigener. (ciclo 2)	0,374	0,166	0,305	0,26
MEA 5M - Campione assorb. (ciclo 3)	0,491	0,266	0,450	0,354
MEA 5M - Campione rigener. (ciclo 3)	0,280	0,219	0,349	0,303
MEA 5M - Campione assorb. (ciclo 4/finale)	0,470		0,490	
MEA 5M - Campione rigener. (ciclo 4/finale)	0,195		0,357	

Considerazioni sull'influenza dei principali parametri operativi

La temperatura dell'ammina in ingresso è stata incrementata utilizzando il preriscaldatore elettrico installato nel corso della precedente campagna sperimentale. Nelle prime campagne sperimentali la temperatura di preriscaldamento

è stata di 70 °C, mentre successivamente è stata diminuita sino a 40 °C al fine di ridurre fenomeni di instabilità all'interno della colonna di stripping; in particolare si sono verificate fluttuazioni del livello di ammina in colonna, fenomeni che hanno determinato difficoltà di gestione e controllo del processo.

Considerazioni sul consumo energetico specifico nel processo di rigenerazione del solvente C

in Tabella 66 si riporta una sintesi dei dati relativi all'energia specifica assorbita dal ribollitore nell'impianto di separazione delle ammine, ottenuti a partire dai dati medi registrati durante il funzionamento dell'unità.

Tabella 66. Confronto tra le prestazioni riscontrate nelle prove di assorbimento

Test	18.04.2013	30.05.2013	06.06.2013	20.06.2013
Configurazione	Singolo assorbitore	Due assorbitori (controcorr.)	Due assorbitori (controcorr.)	Due assorbitori (controcorr.)
Potenza elettrica ribolliture (kW)	12	12	11	11
Portata CO ₂ (kg/h)	3,9	3,9	3,5	3,9
Energia specifica consumata al ribolliture (kWh/kgCO ₂)	3,07	3,07	3,14	2,82

Dalla tabella emerge che il consumo energetico specifico per il desorbimento della CO₂ si discosta dal valore di letteratura (pari a circa 0,8-1 kWh/kgCO₂). Si nota anche che esso migliora passando da un valore molto vicino a 3 kWh/kgCO₂ nel test sperimentale del 30/05/2013 ad un valore pari a 2,8 kWh/kgCO₂ nel test sperimentale del 20/06/2013. Un tale miglioramento è dovuto a una modifica apportata al sistema di controllo della colonna di rigenerazione; infatti nei test condotti fino al 30/05/2013 il ribollitore elettrico della colonna di rigenerazione veniva gestito da un inverter che veniva regolato dal sistema di controllo dell'unità di rigenerazione con un algoritmo ON-OFF. Nei test successivi al 30/05/2013 tale sistema è stato modificato e la gestione dell'inverter del ribollitore elettrico avviene tramite un controllo proporzionale-integrale-derivativo (PID); i risultati di tali modifiche dovranno essere verificati in ulteriori test sperimentali.

Conclusioni

La campagna sperimentale sul processo di cattura pre-combustione della CO₂ e sul processo di rigenerazione dei solventi presso la Piattaforma Pilota Sotacarbo è stata programmata ed effettuata al fine di approfondire le conoscenze del processo e migliorare le prestazioni dell'impianto in condizioni operative generalmente differenti da quelle testate nelle precedenti campagne sperimentali.

Particolare attenzione è stata data all'ottimizzazione del sistema di assorbimento della CO₂ costituito dai reattori a bolle situati lungo la linea a caldo e all'ottimizzazione del processo di rigenerazione dei solventi a base amminica. Le due unità di assorbimento della CO₂ e di rigenerazione dei solventi sono state fatte funzionare in circuito chiuso tramite alcune piccole modifiche sull'impianto e mediante una corretta scelta della configurazione impiantistica ottimale.

Tale configurazione ottimale è risultata essere costituita dai due reattori a bolle posti in serie, con liquido e gas fluenti in controcorrente; infatti tale configurazione permette di massimizzare il caricamento del solvente a base di ammina e l'efficienza di assorbimento, e di minimizzare la portata di solvente circolante (riducendo i consumi elettrici necessari per la rigenerazione e per la movimentazione del liquido attraverso le pompe).

Per quanto riguarda l'unità di rigenerazione si è ridotto il consumo elettrico del ribollitore migliorando la gestione e il controllo dello stesso. In particolare è stato modificato il sistema di regolazione e controllo dell'inverter del ribollitore elettrico passando da un sistema di controllo semplice "ON-OFF" a un sistema più complesso con un controllo proporzionale-integrale-derivativo.

Sulla base delle indicazioni e delle principali problematiche emerse nel corso della campagna sperimentale, è dunque possibile definire quelle che possono essere le principali linee di sviluppo della tecnologia. Esse riguardano principalmente i seguenti aspetti:

- miglioramento dell'efficienza di assorbimento del sistema costituito dai reattori a bolle effettuando delle modifiche al fine di ottimizzare i parametri fondamentali;
- ottimizzazione delle analisi sul solvente liquido acquistando nuove strumentazioni che permettano di analizzare "on line" alcuni parametri relativi al solvente, che sono risultati essere fondamentali per il controllo dei processi di rigenerazione e assorbimento (ad esempio la densità del solvente rigenerato e di quello esausto);

- ulteriore ottimizzazione del sistema di gestione e controllo dell'unità di rigenerazione;
- aumento del numero dei cicli di assorbimento/rigenerazione al fine di valutare il decadimento delle prestazioni del solvente.

Tutte le attività condotte da SOTACARBO sono state concordate e svolte sotto il diretto controllo e la supervisione scientifica di ENEA.

Ottimizzazione del trattamento e conversione del syngas

L'attività è volta, da un lato, ad approfondire la tecnologia per il trattamento e la successiva conversione del syngas, proveniente da carbone anche di basso rango, con produzione di metano (SNG) attraverso un processo catalitico di idrogenazione di CO e CO₂, dall'altro a mettere a punto metodi di cracking catalitico del tar per la purificazione del syngas.

Trattamento e conversione del syngas per produzione di SNG

La produzione di SNG da carbone ha visto una recente crescita di interesse dato l'aumento tendenziale del prezzo del gas e del petrolio ed un parallelo sviluppo di nuove tecnologie che permettono l'utilizzo più pulito del carbone. Tale sviluppo sta portando anche a un grande interesse nei confronti dei cosiddetti Alternative Fuels derivanti dalla gassificazione del carbone: CTL (Coal To Liquid) e SNG (Substitute Natural Gas). In particolare quest'ultimo ha grandi possibilità di mercato nel mondo del refining (utilizzato come fuel gas) e dell'automotive (combustibile per autoveicoli di nuova generazione), ma soprattutto può essere immesso direttamente nei gasdotti per il potenziamento delle reti di distribuzione.

Va sottolineato che i processi SNG da carbone presentano una forte integrazione con le tecnologie CCS. Negli impianti SNG convenzionali sono infatti presenti sezioni impiantistiche che catturano, per esigenze di processo, la CO₂ o che la utilizzano come volano termico nel processo stesso per poi catturarla a valle della metanazione.

In questo contesto sono stati effettuati presso i laboratori ENEA di Casaccia una serie di test sperimentali sul processo di conversione di syngas, ovvero di miscele di CO/H₂, in metano su catalizzatori commerciali a base di ruthenio:



Tale reazione è fortemente esotermica, a livello industriale viene sviluppata su una serie di reattori tra i quali sono previsti diversi interstadi di raffreddamento. La possibilità che i metanatori possano arrivare in condizioni di runaway termico è molto forte. Per questo motivo i principali aspetti di ricerca ed innovazione nel processo di metanazione sono concentrati nell'integrazione di sistema e nella progettazione e realizzazione di reattori in grado di asportare il calore di reazione in modo ottimale.

Il fine ultimo dell'attività ENEA è stato quello di approfondire e studiare le problematiche legate alla reazione di metanazione, nel particolare: le migliori condizioni di processo ovvero pressione e temperatura, nonché le velocità spaziali più idonee e la gestione delle temperature. L'insieme delle informazioni saranno quindi elaborate per definire una cinetica e quindi operare un successivo upgrade progettando reattori per impianti di scala maggiore.

Al fine di studiare il processo di metanazione si è allestito un apparato sperimentale operante in pressione costituito da un sistema di adduzione dei gas di reazione opportunamente miscelati che vengono inviati ad un reattore tubolare a letto fisso (Figura 265). L'apparato sperimentale è dotato di un sistema di analisi in continuo dei gas prodotti, ed equipaggiato di termocoppie per monitorare l'andamento delle temperature sia internamente al reattore all'uscita che del gas entrante. Le temperature vengono acquisite in continuo mediante un datalogger e così possibile monitorare l'andamento del processo controllando online eventuali incrementi repentini delle temperature che potrebbero danneggiare sia il catalizzatore che il reattore compromettendo le prestazioni del sistema.

Sono stati eseguiti differenti test variando la

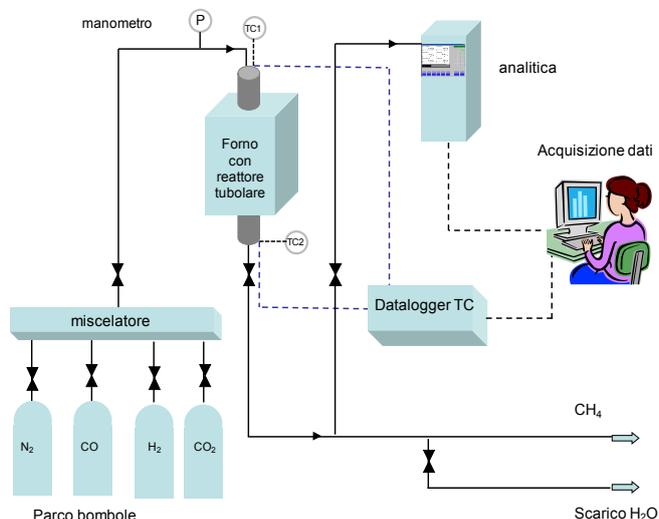


Figura 265. Schema del set up sperimentale utilizzato

pressione operativa (1-5 bar visualizzata grazie ad un manometro collegato con l'interno del reattore), la temperatura (250-350°C) e la composizione della miscela incrementando il contenuto di H₂ fino ai valori stechiometrici (15%CO/85%H₂ - 20%CO/80% H₂ - 25%CO/75%H₂). I risultati (Figura 266) indicano rese fortemente dipendenti dalla pressione di esercizio e dalla temperatura. A pressione atmosferica si sono ottenute conversioni in metano pari al 50% che sono decisamente salite con l'incremento della pressione per arrivare a valori dell'82% a 5 bar. Sono state indagate parallelamente le condizioni ottimali per minimizzare le reazioni parassite quali quella dello shift che sottraendo CO alla reazione di metanazione produce H₂ e CO₂, reazione favorita a pressione atmosferica.

I risultati di questa attività sono illustrati nel rapporto RdS/2013/200.

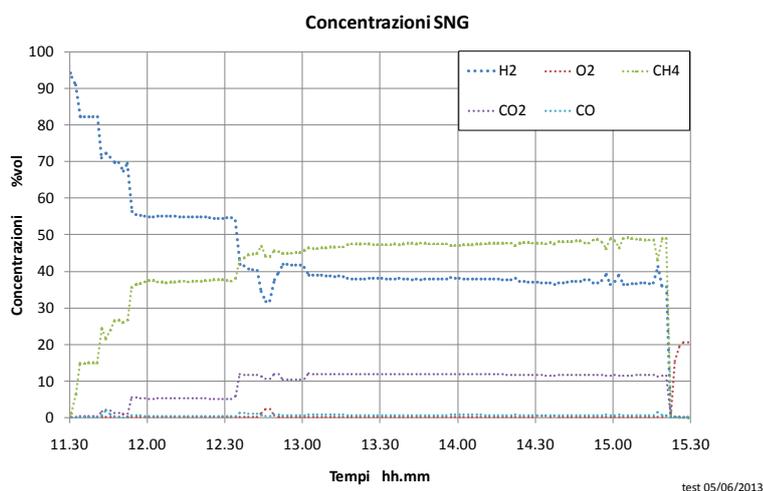


Figura 266. Andamento delle concentrazioni % vol del test sperimentale a 1 atm

Nell'ambito di questa attività, è stato attivato un accordo di collaborazione con l'Università di Cagliari, Dipartimento di Chimica e Geologia, per quanto riguarda in particolare la messa a punto dei catalizzatori della reazione di metanazione.

La reazione di metanazione del CO è stata condotta a pressione atmosferica in un reattore continuo a letto fisso, collegato in linea con un gascromatografo per la determinazione quantitativa della composizione della miscela di reazione.

Le condizioni operative utilizzate sono le seguenti: TR = 300 °C; ctz: 50 mg; flusso totale = 55,4 mL/min; t-o-s = 4 h; composizione miscela di alimentazione (moli%): H₂=21,1; CO=11,7; N₂=67,2; GHSV=66480 mL/h/gctz. Il rapporto molare H₂:CO = 2:1, inferiore a quello stechiometrico (3:1) è stato scelto per un primo screening dell'attività catalitica in base alla considerazione che nel syngas proveniente dalla gassificazione del carbone tale rapporto è sicuramente inferiore al rapporto stechiometrico. Prima della reazione, i campioni sono stati sottoposti ad un trattamento di riduzione in atmosfera di idrogeno per 1 ora , a 300 o a 400 °C.

I catalizzatori testati, sono stati sintetizzati mediante il metodo Hard Template (HT), che consente di ottenere, tramite un meccanismo di "direct-nanocasting", una replica negativa relativamente precisa dell'agente template che viene utilizzato. Tale procedura per l'ottenimento di materiali non silicei nanostrutturati coinvolge tre stadi principali: i), sintesi del template; ii), step di riempimento del sistema poroso con i precursori degli ossidi desiderati, che include anche la conversione del precursore a solido; e iii), rimozione del template, come esemplificato nella Figura 267. Il materiale ottenuto presenta aree specifiche elevate ed una struttura mesoporosa ordinata, generalmente non conseguibili con le procedure di preparazione convenzionali.

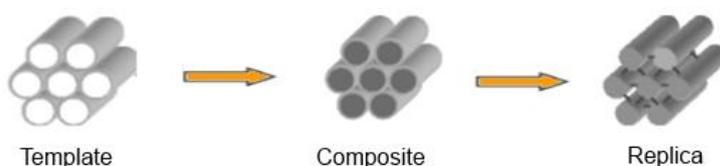


Figura 267. Stadi della procedura di fabbricazione di materiali non silicei nanostrutturati

Sono stati preparati due sistemi di ossidi: il primo comprende il Co₃O₄ puro e tre campioni Cu-Co₃O₄, denominati rispettivamente CuCo-9, CuCo-13 e CuCo-17, in cui il numero indica il rapporto atomico Cu:Co (%), determinato

mediante ICP; il secondo comprende i campioni NiO-Me_xO_y(z), con Me = Ce, Co, La, e z = rapporto molare Ni:Me, determinato mediante ICP, denominati NiCe(0,42), NiCe(0,83), NiCe(1,02), NiCo(1,93), NiLa(2,33). I campioni sono stati caratterizzati mediante adsorbimento fisico di azoto, XRD, TPR e TEM. I risultati dell'analisi di tessitura hanno mostrato che tutti i campioni hanno aree superficiali di ca. 100 m²/g. I risultati catalitici sono riassunti nelle tabelle 67 e 68.

Tabella 67. Risultati catalitici per i campioni Co₃O₄ e Cu-Co₃O₄

Condizioni operative: T_R = 300 °C; ctz: 50 mg; flusso totale = 55,4 mL/min; t-o-s = 4 h; GHSV = 66480 mL/h/g_{ctz}; alimentazione (moli %): H₂ = 21,1; CO = 11,7; N₂ = 67,2. Pretrattamento in H₂ (20 mL/min) per 1 h a 300 °C

Campione	X _{CO} (mol%)	S _{CO2} (mol%)	S _{CH4} (mol%)	S _{tot} (mol%)	CH ₄ /CO ₂ (mol/mol)	Altri prodotti	R _{X(4,1)} ^(a) (%)	R _{X(6,1)} ^(a) (%)
Co ₃ O ₄ ^(b)	97,0	34,8	58,6	93,4	1,68	presente picco etano e propano	99,6	99,4
CuCo-9	46,7	36,7	58,3	95,0	1,59	presente picco etano	78,1	71,1
CuCo-13	39,8	31,4	56,2	87,7	1,79	presente picco etano	76,3	69,6
CuCo-17	47,9	31,1	55,1	86,2	1,77	presente picco etano	74,2	62,7

^(a) Rapporto tra i valori di conversione rispetto alla 1^a ora di reazione; i numeri tra parentesi indicano le ore di reazione prese in considerazione

Come si può notare dalla Tabella 67, il Co₃O₄ puro mostra una conversione praticamente completa del CO ed una attività che rimane stabile nel range di t-o-s indagato (R_{X(6,1)} > 99%). Il contributo della WGS è abbastanza elevato, come evidenziato dal valore del rapporto molare CH₄/CO₂.

L'introduzione del Cu peggiora le prestazioni del catalizzatore, sia in termini di attività che di stabilità. La presenza di picchi di etano e propano nel cromatogramma sembrano suggerire la formazione di idrocarburi superiori (reazioni tipo Fischer-Tropsch).

Rispetto ai catalizzatori della prima serie, il comportamento catalitico dei campioni a base di Ni sembra essere decisamente migliore: la conversione è sempre intorno al 99% ed i catalizzatori sono stabili nel range di t-o-s investigato. Il rapporto molare CH₄/CO₂ è più alto che nel caso dei sistemi a base di ossido di cobalto, eccetto che nel caso del campione NiCo(1,93) e sembra dipendere dal contenuto di Ni. Anche in questo caso è stata osservata, per alcuni campioni, la presenza dell'etano tra i prodotti di reazione.

Tabella 68. Risultati catalitici per i campioni NiO-Me_xO_y

Condizioni operative: T_R = 300 °C; ctz: 50mg; flusso totale = 55 mL/min; t-o-s = 4 h; GHSV = 66480 mL/h/g_{ctz}; alimentazione (moli %): H₂ = 21,1; CO = 11,7; N₂ = 67,2. Pretrattamento in H₂ (20 mL/min)

Campione	X _{CO} (mol%)	S _{CO2} (mol%)	S _{CH4} (mol%)	S _{tot} (mol%)	CH ₄ /CO ₂ (mol/mol)	Altri prodotti	R _{X(4,1)} ^(a) (%)	R _{X(6,1)} ^(a) (%)
NiCe (1.02)	99,5	23,8	74,5	98,3	3,61	-	99,8	-
NiCe(0,83)	99,6	22,1	76,8	98,9	3,48	-	99,9	99,8
NiCe (0.42)	99,3	24,3	71,3	95,6	2,94	presente picco etano	99,9	-
NiCo (1.93)	97,1	32,1	56,3	88,4	1,76	presente picco etano	100	100
NiLa (2.33)	99,3	26,9	69,2	96,1	2,57	presente picco etano	99,9	99,6

^(a) Rapporto tra i valori di conversione rispetto alla 1^a ora di reazione; i numeri tra parentesi indicano le ore prese in considerazione

Alla luce dei risultati catalitici ottenuti, che sembrano essere piuttosto promettenti, sono in corso ulteriori prove a diverse temperature di reazione, e con diversi rapporti H₂:CO. Sui campioni con le migliori prestazioni, sono inoltre state eseguite prove di durata e prove in cui l'alimentazione è costituita da miscele CO/CO₂ oppure da CO₂.

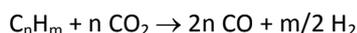
I risultati di questa attività sono illustrati nel rapporto RdS/2013/201.

Cracking catalitico del TAR: sviluppo e test di catalizzatori

Le attività, svolte nell'ambito di questa azione di ricerca dall'Università Roma "Sapienza", Dipartimento Ingegneria Chimica, riguardano lo sviluppo di tecnologie di gassificazione del carbone volte all'ottimizzazione della qualità del syngas prodotto ed, in particolare, all'abbattimento della CO₂ e del tar in esso contenuti. La CO₂ generata dai processi di gassificazione, infatti, oltre a rappresentare un gas serra, contribuisce a ridurre il potere calorifico del gas combustibile ottenuto.

Il syngas in uscita dal reattore di gassificazione contiene un'alta percentuale di tar, prodotto durante la fase di pirolisi, che deve essere rimosso. Il tar è costituito da composti organici che hanno una temperatura di ebollizione superiore a quella del benzene. I composti contenuti nel tar condensano quando si trovano a temperature inferiori al loro punto di rugiada, determinando l'intasamento di apparecchiature, tubazioni, filtri, macchinari e turbine e portando quindi ad un aumento dei costi di manutenzione dell'impianto. Nel tar sono contenute anche sostanze cancerogene che devono essere rimosse allo scopo di salvaguardare la salute dell'uomo e dell'ambiente. Inoltre il tar detiene una grande parte del potere calorifico del combustibile di partenza che può essere trasferito al syngas trasformandolo in composti volatili come H₂, CH₄ e CO.

Per la rimozione del tar e della CO₂ dal syngas viene proposto il processo di dry-reforming in cui il tar reagisce con la CO₂ ottenendo CO e H₂ secondo la reazione:



Il processo di dry-reforming è endotermico ed è quindi necessario fornire calore dall'esterno per far avvenire le reazioni. Termodinamicamente il processo è favorito a temperature superiori a 730 °C per il metano, che diventano di poco inferiori per gli idrocarburi superiori. Per favorire la cinetica del processo è necessario l'utilizzo di un catalizzatore.

Per studiare il processo sono state inizialmente effettuate delle prove di dry-reforming sul metano. Sono stati provati diversi tipi di catalizzatori già utilizzati per lo steam reforming (figura 268)

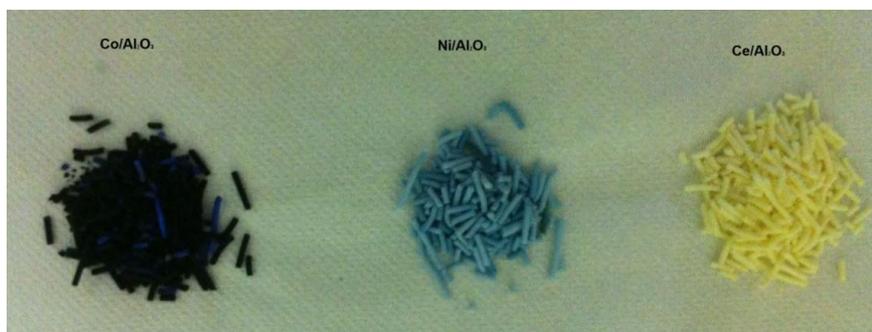


Figura 268. Catalizzatori impiegati nei test sperimentali

Inoltre sono stati preparati dei catalizzatori a base di Ni e Ce supportati su allumina che hanno mostrato una buona attività catalitica. Da diversi studi di letteratura si evince che la presenza di cerio nel catalizzatore comporta una maggiore resistenza alla deposizione di carbone e quindi una minore disattivazione del catalizzatore stesso. Questo aspetto è molto importante nel caso di dry-reforming del tar, visto il suo elevato rapporto C/H e la sua tendenza a formare coke a temperature elevate. Dopo aver individuato i catalizzatori migliori per il processo di dry-reforming del metano, questi sono stati testati su dei composti puri quali iso-ottano, toluene e naftalene che sono tra i maggiore composti presenti nel tar. In Tabella 69 sono riportate le rese in CO e H₂ ottenute con tre diversi tipi di catalizzatore: un catalizzatore contenente Ce, e due catalizzatori a base di Ni, Co e Ce supportati su allumina e carbone attivo (CA).

Tabella 69. Risultati delle prove di dry reforming effettuate con iso-ottano, toluene e naftalene

Catalizzatore		Resa CO (%)	Resa H ₂ (%)
CeZrKRuO ₂	C ₈ H ₁₈	63,3	22,5
	C ₇ H ₈	54,2	14,3
	C ₁₀ H ₈	31,8	5,4
NiCoCe/Al ₂ O ₃	C ₈ H ₁₈	48,1	13,2
	C ₇ H ₈	32,0	9,8
	C ₁₀ H ₈	27,1	2,5
NiCoCe/CA	C ₈ H ₁₈	5,1	3,2
	C ₇ H ₈	1,6	-
	C ₁₀ H ₈	-	-

I migliori risultati si sono ottenuti con il catalizzatore CeZrKRuO₂. Anche con il catalizzatore a base di NiCoCe/Al₂O₃ si ottengono buone rese, confrontabili con i dati di letteratura. Quindi prima di valutare la possibilità di effettuare

il dry-reforming del tar con catalizzatori a base di metalli come il Ru, caratterizzati da un costo elevato, sono stati provati i catalizzatori a base di Ni.

L'apparato sperimentale del dry-reforming del tar è costituito da un reattore a doppio stadio, un primo stadio di pirolisi e gassificazione ed un secondo catalitico a letto fisso. Per prima cosa è stata calcolata la percentuale di tar prodotta in assenza di catalizzatore che è risultata essere il 14% in peso del solido di partenza. In Tabella 70 sono riportati i risultati ottenuti dalle varie prove effettuate sia con il carbone attivo sia con l'allumina.

Tabella 70. Percentuale di tar in uscita dal reattore catalitico in funzione di diversi catalizzatori

Tipo di catalizzatore	Tar (% g tar/g solido)
Carbone attivo	7,8
NiCoCe/carbone attivo	4,0
Al ₂ O ₃	3,0
NiCoCe/Al ₂ O ₃	1,95

Utilizzando il catalizzatore NiCoCe/Al₂O₃ si ottiene un'elevata efficienza di rimozione del tar con una riduzione della sua percentuale nel syngas rispetto al processo non catalitico del 87%. In Figura 269 vengono riportate le concentrazioni di CO, CH₄ e CO₂ che si ottengono a valle del dry-reforming, si può notare una notevole diminuzione della concentrazione media di CO₂ che nel caso di processo non catalitico era del 21% vol.

Le prove sperimentali effettuate hanno dimostrato la possibilità di rimuovere il tar e l'anidride carbonica dal syngas tramite il dry-reforming. Si riesce così a recuperare la maggior parte del potere calorifico contenuto nel tar e a diminuire la diluizione del syngas dovuta alla presenza di CO₂. In questo modo si ottiene un gas con alto potere calorifico composto principalmente da CO, H₂ e CH₄.

I risultati di questa attività sono illustrati nel rapporto RdS/2013/202.

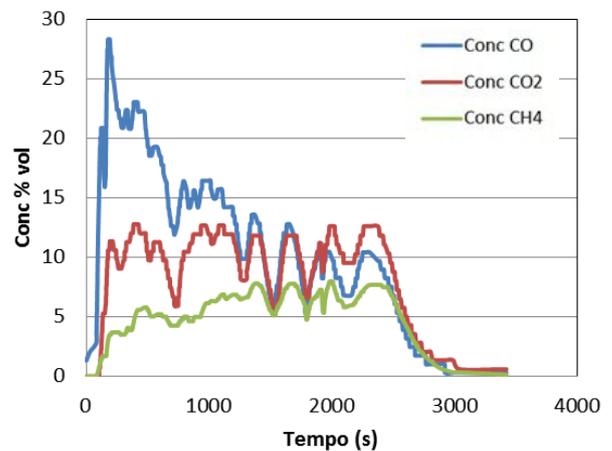


Figura 269. Composizione del gas in uscita dallo stadio catalitico con NiCoCe/Al₂O₃

Sviluppo di un innovativo processo di pirolisi e gassificazione separate del carbone

La piattaforma sperimentale ENEA denominata VAL.CH.I.RI.A (VALorizzazione CHar, Impianto Ricerche Avanzate) nasce come facility per lo studio di un ciclo integrato di pirolisi, gassificazione e combustione del carbone, per l'ottimizzazione della produzione di syngas ad alto contenuto di idrogeno e a basso impatto ambientale. Essa inoltre consente di fornire informazioni utili per l'approfondimento delle tematiche scientifiche affrontate sulla piattaforma Zecomix, circa i processi di pirolisi del carbone e gassificazione del char prodotto. Su di esso inoltre possono essere condotte campagne sperimentali di produzione di idrogeno attraverso reforming del metano con contemporanea cattura della CO₂ attraverso sorbenti solidi.

La versatilità dell'impianto permette l'utilizzo dello stesso anche in relazione a studi sul comportamento di combustibili non convenzionali come biomasse e miscele carbone /biomasse.

In virtù della sua struttura è anche possibile utilizzare i vari componenti o sottosistemi in modo separato o in modo integrato secondo le seguenti modalità:

- alimentazione – pirolisi – torcia;
- alimentazione – gassificazione – torcia;
- alimentazione – pirolisi – gassificazione – torcia.

La pressione di esercizio è prossima a quella atmosferica per facilitare l'esecuzione delle prove e la realizzazione strutturale della componentistica.

Tutta l'attività prevista in questo tema è stata condotta da ENEA.

Completamento della piattaforma sperimentale VALCHIRIA

Si è proceduto alla realizzazione e montaggio dei vari componenti meccanici ed al loro assemblaggio (Figura 270).



Figura 270. Piattaforma VALCHIRIA - Panoramica

In corso di realizzazione sono state apportate alcune modifiche impiantistiche; in particolare è stato progettato e realizzato:

- un sistema di raffreddamento ad acqua attraverso l'utilizzo di due scambiatori a gorgogliamento di dimensioni diverse, con possibilità di riempimento parziale di acqua. In entrambi gli stadi di raffreddamento sono previste serpentine entro le quali far scorrere acqua a temperatura ambiente per asportare il calore accumulato nel gorgogliatore;
- un sistema di riscaldamento tramite canne scaldanti delle correnti in ingresso al gassificatore;
- l'inserimento di una soffiante sulla linea in ingresso al gassificatore per contrastare le perdite di carico dovute al piatto poroso di distribuzione, e ad altre resistenze concentrate e distribuite presenti nel piping della piattaforma.

Definizione del Sistema di Comando e Controllo

Si è provveduto alla realizzazione di un Sistema di Comando e Controllo operabile direttamente da sala controllo (Figura 271), eliminando i vari comandi previsti presso il quadro elettrico posto in campo. Con questa configurazione la piattaforma VAL.CH.I.R.I.A risulta operabile da remoto con esclusione della manovra valvole e la lettura di alcuni punti di misura (temperature e pressioni) di importanza secondaria.

Definizione del Sistema di Campionamento e Analisi relativo agli effluenti gassosi

Si è provveduto a predisporre un sistema di campionamento e analisi da collegare al già esistente sistema gascromatografico utilizzato per la piattaforma ZECOMIX. Questo è costituito da un armadio all'interno del quale è posizionato il gas-cromatografo (modello Agilent serie 6850) e relativo sistema di campionamento a 12 vie e pompa di aspirazione per la determinazione di: H_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 e H_2S .

I risultati delle attività delle azioni sopradescritte sono riportati nel rapporto RdS/2013/203.

Realizzazione di prove sperimentali preliminari

In attesa del collaudo finale della piattaforma VALCHIRIA, si è proceduto alla definizione di una campagna sperimentale a supporto di quella da impostare sulla nuova piattaforma. In particolare, sono stati pianificati e realizzati alcuni test sperimentali di pirolisi, a supporto dell'attività che sarà condotta su VAL.CH.I.R.I.A, al fine di

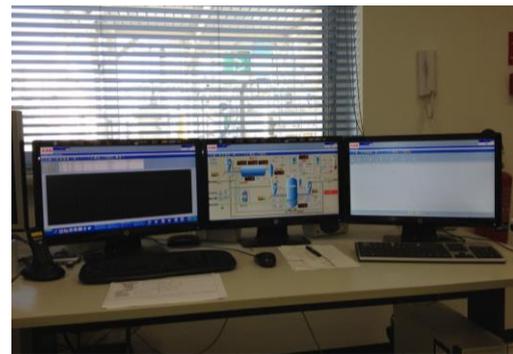


Figura 271. Impianto VALCHIRIA - Sala controllo

comprendere in che modo le variabili di processo influenzano le prestazioni dello stesso, in termini di quantità prodotte (rese in fase solida e in fase gas) e di qualità del gas ottenuto (composizione volumetrica e potere calorifico inferiore).

I test sono stati effettuati presso un impianto di pirolisi disponibile presso il Centro ENEA di Trisaia (Figura 272).



Figura 272. Impianto di pirolisi ENEA- C.R. Trisaia

Gli effetti osservati possono essere così riassunti:

- in test condotti utilizzando la stessa tipologia di carbone (diametro variabile da 4 a 10 mm) e mantenendo costante la temperatura di pirolisi ($T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$), un aumento del tempo di residenza consente (i) una maggiore produzione di tar e di gas durante il processo, (ii) riduzione della formazione della fase solida, (iii) leggero incremento del tenore di idrogeno, (iv) riduzione della resa in metano, (v) maggiore produzione dei composti C_{2+} favoriti da un più prolungato cracking termico del materiale;
- lo stesso incremento del tempo di residenza si traduce in un lieve incremento del valore del CGE (Cold Gas Efficiency);
- un aumento della temperatura di processo consente una maggiore devolatilizzazione dei componenti presenti nella matrice di partenza, con una riduzione della resa della fase solida. La devolatilizzazione riguarda sia i composti più pesanti, che tendono a condensare a temperatura ambiente, e che quindi vanno ad incrementare la resa in tar, sia i componenti più volatili che restano in fase gassosa anche successivamente al raffreddamento del gas prodotto, con un conseguente incremento della resa in fase gas. Per ciò che concerne la composizione della fase gassosa, un aumento della temperatura di pirolisi contribuisce notevolmente all'incremento del tenore di idrogeno presente in fase gas, mentre si nota una riduzione dei componenti più pesanti i cui legami tendono a rompersi più facilmente alle più alte temperature. Infine, dal punto di vista energetico un aumento della temperatura di pirolisi comporta un notevole incremento del valore del CGE;
- l'impiego di un carbone di pezzatura inferiore consente una migliore diffusione del calore al suo interno e di conseguenza un maggiore consumo della fase solida e una maggiore devolatilizzazione dei componenti volatili presenti nella matrice. Gli effetti della dimensione caratteristica del carbone non influenzano particolarmente la composizione della fase gassosa prodotta mentre si osserva un notevole incremento del CGE;
- di notevole interesse risulta l'aumento del "Cold Gas Efficiency", soprattutto con l'aumento della temperatura di processo e con la riduzione della pezzatura del carbone, in quanto l'ipotesi presa in considerazione è che il gas proveniente dalla prima fase di pirolisi del carbone possa essere combusto per la fornitura di quota parte dell'energia richiesta dalla reazione endotermica di gassificazione.

I risultati delle attività citate sono descritte nel rapporto RdS/2013/261.

b.2 Produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS

L'obiettivo del sub-task prevede attività di studio teorico e sperimentale sui processi di produzione e sintesi di combustibili liquidi (Coal To Liquid) e gassosi (idrogeno) a partire dal carbone, analizzando il loro sviluppo e integrazione con le tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 .

Nel dettaglio l'attività è articolata in due temi di ricerca:

- Analisi tecnico-economica, tesa ad approfondire le attività svolte nella passata annualità. A partire dall'inventario dei punti di emissione di gas e fumi contenenti CO₂ a diversi livelli di concertazione presenti nell'impianto viene valutata l'integrazione di differenti sezioni di cattura della CO₂ effettuando un'analisi dell'impatto dell'applicazioni delle tecnologie CCS sulle prestazioni dell'impianto e sul costo specifico di produzione dei combustibili liquidi. L'attività in oggetto è svolta da ENEA.
- Sperimentazione, su scala laboratorio, della sintesi Fischer Tropsch. Attività sperimentale su scala laboratorio, di supporto alla parte di analisi di sistema, Con l'obiettivo di definire le condizioni ottimali del processo, testando differenti tipologie di catalizzatori e differenti condizioni operative, a prosieguo di azioni iniziate nelle precedenti annualità. Questa seconda attività è stata oggetto di un Accordo di Collaborazione con Politecnico di Milano, Dipartimento Energia.

Analisi tecnico-economica

E' stata condotta, da ENEA, un'attività di carattere teorico sui processi di produzione e sintesi di combustibili liquidi (Coal To Liquid) e gassosi (idrogeno) a partire dal carbone, analizzando il loro sviluppo e integrazione con le tecnologie di cattura e stoccaggio della CO₂.

In quest'ambito, sono state approfondite le attività di analisi tecnico-economica del processo eseguite nella passata annualità con l'ausilio del codice di simulazione impiantistica commerciale Aspen.

Si è quindi analizzato l'impianto applicando la cattura della CO₂ su tutti i punti di emissione, così da realizzare un impianto quasi ad emissione zero. Conseguentemente, a seconda della concentrazione della CO₂, si sono applicate tecnologie di cattura pre-combustion sul syngas (Selexol) e post combustion su i fumi (a base di ammine MEA-5M).

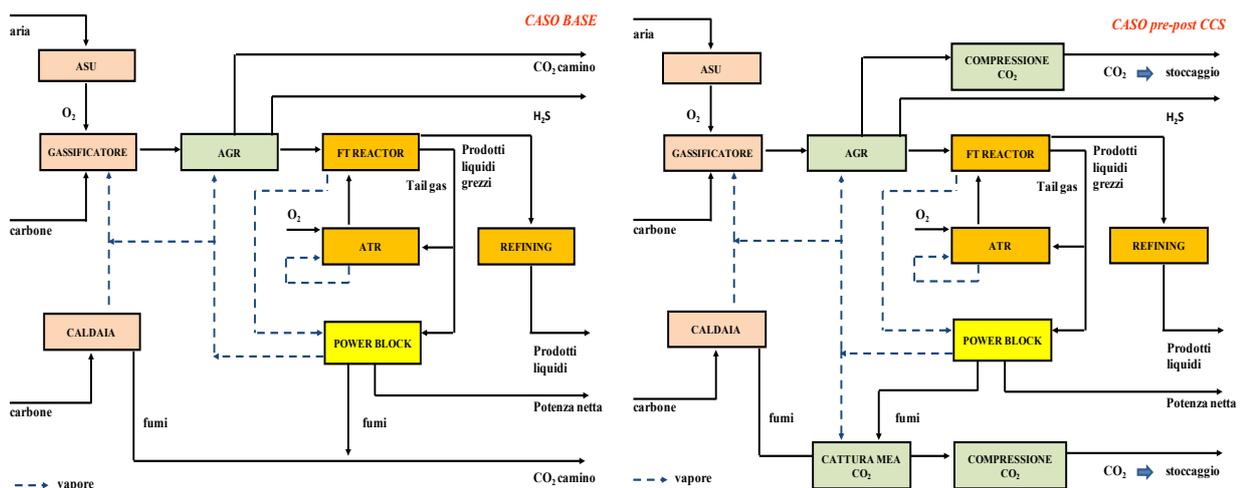


Figura 273. Schema a blocchi dei due impianti

In seguito all'ottimizzazione degli scambi energetici tra le varie sezioni si è stimato come l'inserimento delle tecnologie CCS influenzi le prestazioni in termini di efficienza energetica dell'impianto. Integrando le sezioni di cattura nell'impianto si è definita la configurazione impiantistica studiata.

Nel particolare si è integrata la sezione di rigenerazione delle ammine con il vapore proveniente dal ciclo di potenza. I risultati indicano che per produrre 9000 bbl/giorno di prodotto liquido grezzo, con un consumo di 4500 t/giorno di carbone, si hanno rendimenti del 47%.

Inserendo la cattura il rendimento scende a valori del 43%. Conseguentemente rispetto alla configurazione con la cattura pre-combustion, che presentava rendimenti del 4%, si ha un ulteriore decremento prestazionale, dovuto all'energia spesa per rigenerare il solvente amminico utilizzato per assorbire la CO₂ nei fumi.

Relativamente alla distribuzione degli carichi degli ausiliari la sezione ASU resta la più energivora mentre inserendo la cattura la sezione di compressione della CO₂ ricopre circa il 44% di tutti gli ausiliari.

Gli schemi in Figura 274 riportano sinteticamente i principali ingressi e uscite dell'impianto nelle due configurazioni analizzate.

In merito agli aspetti economici si è effettuata un'analisi finanziaria stimando il VAN e il TIR dell'iniziativa imprenditoriale e valutando quanto questi venissero influenzati dall'inserimento della cattura della CO₂.

I costi di investimento considerati come Total Overnight Cost vedono un leggero incremento pari al 5% rispetto alla configurazione senza cattura, attestandosi a valori di 100000 \$/bbl/giorno per ogni barile di petrolio prodotto al giorno. Va indicato che l'introduzione delle CCS presenta un impatto sui costi minori nel caso della tecnologia CTL rispetto alle tecnologie convenzionali di produzione di energia elettrica quali ad esempio l'IGCC. L'impianto equipaggiato con le tecnologie CCS mostra una redditività (TIR al 18%) per valori del barile di petrolio dell'ordine dei 116 \$/bbl, ben più alti rispetto ai 98 \$/bbl di un impianto senza cattura, mentre l'investimento presenta tempi di ritorno di 13 anni. Il costo specifico di produzione del combustibile raffinato è di circa 83 \$/barile nella configurazione con cattura.

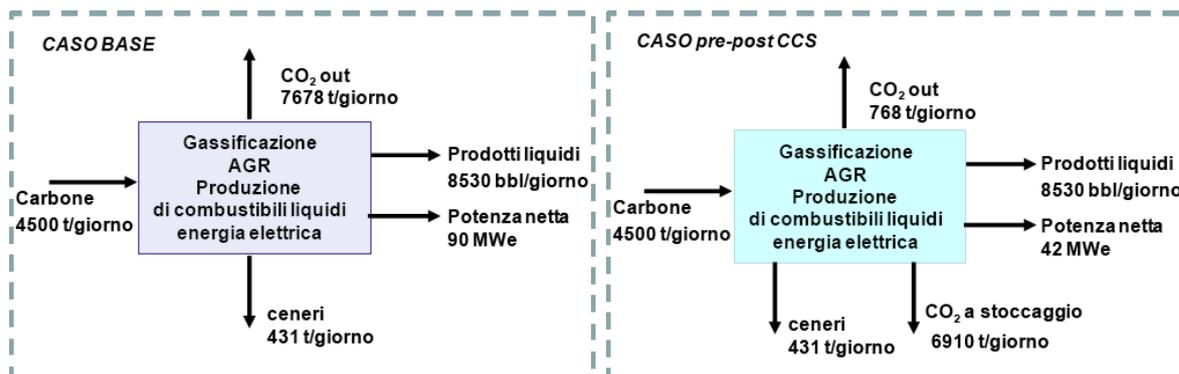


Figura 274. Principali risultati delle due configurazioni studiate

I grafici in Figura 275 riportano i valori della redditività dell'impianto ed il costo sostenuto annualmente per produrre un barile di prodotto liquido \$/bbl in funzione della variazione del prezzo della quota CO₂.

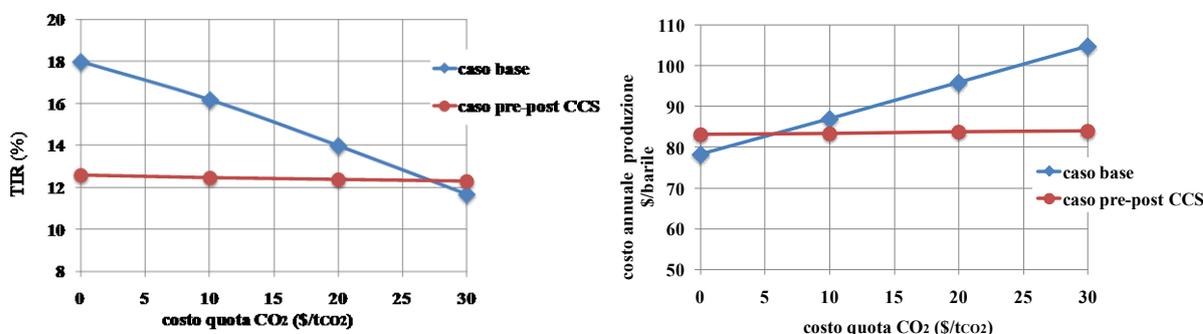


Figura 275. Principali risultati economici delle due configurazioni studiate

Si è infine effettuata un'analisi di sensitività sui parametri che presentavano maggiore incertezza, ovvero si è valutato come variava il costo del combustibile prodotto e la redditività economica dell'impianto al variare del prezzo della quota CO₂. Risultati indicano che l'opzione CCS risulta più competitiva per valori di mercato della quota CO₂ di maggiori di 27 \$/tCO₂, conseguentemente al di sopra di tali valori risulta più conveniente investire nella cattura che pagare le quote di emissione per la CO₂ emessa.

In conclusione l'analisi svolta presenta i risultati di una prefattibilità tecnico-economica di un impianto di poligenerazione, individuando le condizioni di mercato per la sua convenienza. Si può desumere che la poligenerazione risulta un scelta conveniente in quanto presentando una flessibilità dell'impianto risponde più adeguatamente alle richieste diversificate dei prodotti energetici del mercato quali energia elettrica e combustibili di varia natura. Infine va indicato che il presente studio beneficia di un basso costo di approvvigionamento del combustibile e del trasporto della CO₂ essendo l'impianto localizzato a bocca di miniera. L'analisi ha sottolineato la competitività dei combustibili liquidi provenienti dal carbone rispetto al petrolio considerato come prodotto concorrenziale.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto Rds/2013/207.

Sperimentazione, su scala laboratorio, della sintesi Fischer Tropsch

Le attività svolte sul tema dal Politecnico di Milano, Dipartimento Energia, possono essere suddivise in cinque task. Il primo task ha riguardato la messa in esercizio dell'impianto di laboratorio ad alta pressione per la sintesi di Fischer-Tropsch, costruito nel corso della precedente collaborazione con ENEA. In questa prima fase sono state effettuate le seguenti operazioni: taratura dei regolatori di portata, calibrazione del gas-cromatografo, tuning dei controllori ed identificazione della procedura di start-up. Inoltre, è stato sviluppato un programma in Labview® che permetta l'acquisizione delle principali variabili di processo (Figura 276).

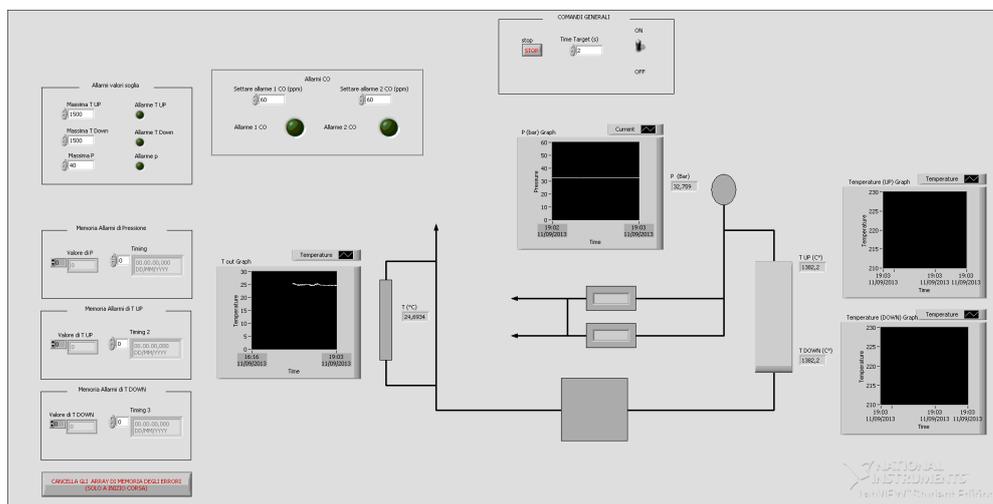


Figura 276. Front-Panel del sistema di acquisizione dati

Nel secondo task è stata investigata la reattività di CO, CO₂ e di una miscela CO/CO₂ in condizioni rappresentative per la sintesi di Fischer-Tropsch (220°C, 30 bar, 6000 Ncm³/h/g_{cat}). La reattività delle tre diverse alimentazioni (32%CO/32%H₂/36%N₂; 32%CO₂/32%H₂/36%N₂; 32%CO/32%H₂/36%CO₂) è stata studiata con un sistema catalitico la cui composizione molare è 100Fe/10Zn/1Cu/2K. Il sistema catalitico impiegato è risultato attivo sia per l'idrogenazione di CO che CO₂, anche se la conversione del CO è circa 1,5 volte superiore a quella della CO₂ a parità di condizioni. La presenza rispettivamente di CO₂ e CO nel pool dei prodotti indica che il catalizzatore è attivo sia la WGS che per la RWGS (Tabella 71).

Tabella 71. Conversione e selettività misurate durante i test di attività catalitica

Catalizzatore	100Fe/10Zn/1Cu/2K			100Fe/10Zn/1Cu/4K		
	CO/H ₂ /N ₂	CO ₂ /H ₂ /N ₂	CO/H ₂ /CO ₂	CO/H ₂ /N ₂	CO ₂ /H ₂ /N ₂	CO/H ₂ /CO ₂
conversione CO [%]	14,1	-	10,5	7,9	-	7,5
conversione CO ₂ [%]	-	8,9	2,7	-	8,3	2,1
conversione H ₂ [%]	21,4	16,1	25,8	14,6	12,6	22,3
selettività CO [%]	-	19,5	-	-	30,3	-
selettività CO ₂ [%]	28,8	-	-	32,0	-	-

In presenza di CO, la CO₂ è risultata sostanzialmente inerte. Tale risultato è stato attribuito ad un adsorbimento competitivo delle due molecole, che rende assai modesta la quantità di CO₂ che riesce ad adsorbirsi sul catalizzatore.

Il tipo di alimentazione non solo influenza l'attività catalitica, ma anche la selettività del processo (Figura 277). Nel caso in cui si alimenti CO/H₂/N₂ si ottiene una classica distribuzione ASF con una doppia pendenza ($\alpha_{C_3-C_8} = 0,63$ e $\alpha_{C_9+} = 0,89$, dove α rappresenta la probabilità di crescita di catena) e in cui il rapporto O/P (rapporto olefina/paraffina) è superiore all'unità per i composti con un numero di atomi di carbonio tra 2 e 16. Diversamente, nel caso di idrogenazione di CO₂ si ottengono prevalentemente idrocarburi leggeri ($\alpha = 0,56$) e paraffinici (il rapporto O/P è sempre inferiore ad 1). Nel caso della miscela CO/CO₂, a conferma dell'inerzia chimica della CO₂, si nota come la distribuzione ASF e l'andamento del rapporto O/P sono identici a quelle ottenuti nel caso di idrogenazione di CO.

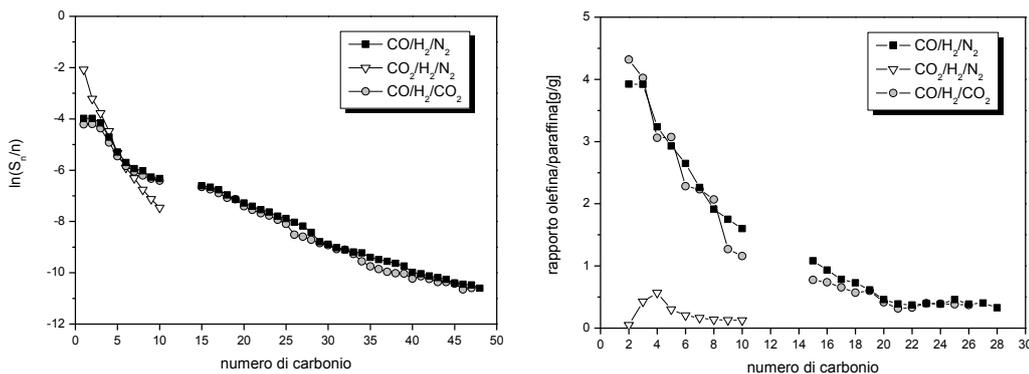


Figura 277. Distribuzione ASF (sinistra), rapporto olefina-paraffina (destra) per il catalizzatore 100Fe/10Zn/1Cu/2K

Nel task 3 è stato investigato l'effetto del carico di potassio (K/Fe=2 e 4 mol/mol) sulla morfologia/struttura/riducibilità del catalizzatore e sulla sua reattività in presenza di miscela CO/H₂, CO₂/H₂, CO/CO₂/H₂. Il catalizzatore con un maggior tenore di potassio presenta un'area superficiale più elevata ed una minore cristallinità. Il potassio ha un effetto negativo sulla riducibilità in quanto incrementa le temperature a cui avvengono sia la riduzione da Fe₂O₃ a Fe₃O₄ sia quella da Fe₃O₄ a ferro metallico. Per quanto concerne l'attività catalitica si è riscontrato che il tenore di potassio modifica la capacità di idrogenare sia CO, che CO₂. Nel caso dell'idrogenazione del CO, il potassio diminuisce l'attività, mentre non ha alcun effetto sulla selettività. Contrariamente, quando si alimenta CO₂/H₂/N₂, l'incremento del potassio non modifica il valore di la conversione, mentre favorisce la crescita di catena e la formazione di olefine (Figura 278).

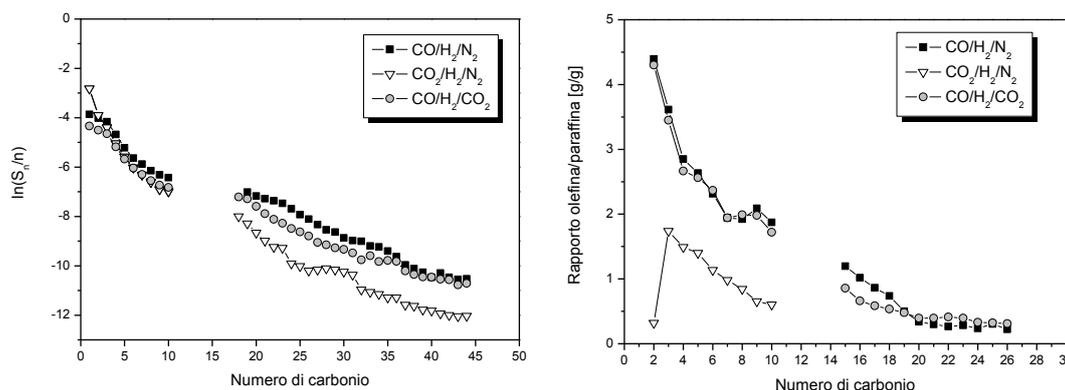


Figura 278. Distribuzione ASF (sinistra), rapporto olefina-paraffina (destra) per il catalizzatore 100Fe/10Zn/1Cu/4K

Il task 4 è consistito in un'analisi di letteratura volta ad individuare i modelli cinetici utilizzati per descrivere la reattività (in termini di velocità di conversione dei reagenti) dei catalizzatori Fischer-Tropsch a base di ferro. Successivamente è stato sviluppato un modello che consentisse di descrivere la velocità di scomparsa di CO tenendo presente sia la reazione Fischer-Tropsch, che la water-gas-shift. In Figura 279 è riportato, a titolo di esempio, un confronto fra i dati sperimentali e le previsioni del modello sviluppato. Il modello descrive i dati in maniera più che soddisfacente.

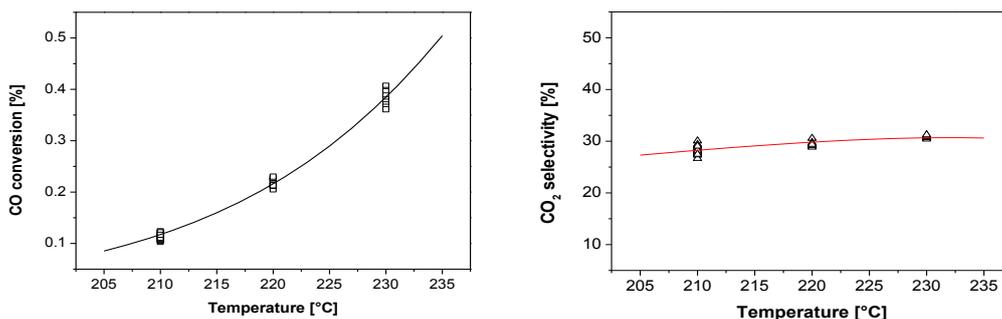


Figura 279. Andamento della conversione di CO e della selettività a CO₂ al variare della temperatura

Infine il task 5 ha riguardato la preparazione e caratterizzazione di catalizzatori in cui il promotore zinco è stato sostituito dal manganese. Tali catalizzatori sono pronti per essere testati nella reazione FT.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/208.

b.3 Cattura della CO₂ con sorbenti solidi

Il sub-task è relativo alla cattura della CO₂ con sorbenti solidi ad alta temperatura, basati su ossidi di calcio. Questi ultimi possono e saranno testati anche in configurazioni di cattura post-combustione, su fumi. Il sub-task si articola quindi in (i) attività di laboratorio, volte allo sviluppo di un sorbente particolarmente performante in termini di capacità di assorbimento e numero di cicli di separazione/rigenerazione senza eccessivo deterioramento, e in (ii) attività sperimentali, condotte su di una piattaforma avanzata (Piattaforma ZECOMIX), in grado di realizzare un ciclo innovativo che preveda gassificazione, trattamento del gas e suo arricchimento in CO₂, cattura con sorbente solido ad alta temperatura, parallela rigenerazione del sorbente, separazione della CO₂ e combustione di un syngas ricco di idrogeno con produzione di energia elettrica.

Messa a punto di un sorbente in grado di raggiungere i 1000 cicli di separazione/rigenerazione senza eccessivo deterioramento

La separazione della CO₂ ad alta temperatura attraverso sorbenti a base di CaO (*calcium looping*) è tra le tecniche di separazione della CO₂ quella più economicamente sostenibile vista l'ampia disponibilità ed il basso costo di sorbenti di origine naturale a base di calcio (dolomite, calcare) e l'assenza di tossicità di questi materiali sia per l'uomo che per l'ambiente.

È opportuno sottolineare che la tecnica di assorbimento con sorbenti solidi è applicabile alla separazione della CO₂ dal gas combustibile (assetto pre-combustion) o dai fumi di combustione (assetto post-combustion). Questo secondo assetto viene testato, nel corso del programma ENEA, sempre sulla piattaforma ZECOMIX.

Oltre ai materiali sorbenti di origine naturale, si stanno studiando materiali sintetici, sempre a base di CaO, che risultino essere più resistenti e stabili in operazioni che prevedono un certo numero di cicli di separazione della CO₂. Sulla piattaforma ZECOMIX di ENEA è prevista l'implementazione di un processo per la produzione di H₂ da metano in *single step* attraverso la tecnologia SESMR (Sorption Enhanced Steam Methane Reforming). Il processo ha luogo in un reattore a letto fluidizzato, costituito da particelle di catalizzatore attivo per il reforming del metano (Steam Methane Reforming, SMR) e particelle a base di CaO per la separazione della CO₂ ad alta temperatura. In questo modo la cattura della CO₂, secondo il principio di Le Chatelier, avrà come risultato un aumento della produzione di H₂ già a 650 °C. Durante la reazione gas-solido, i grani di CaO si convertono in CaCO₃ aumentando di conseguenza le proprie dimensioni e riducendo il grado di vuoto all'interno della particella. Questo fenomeno potrebbe ridurre di conseguenza l'efficienza dell'intero processo di produzione di H₂.

La reazione di reforming del metano è altamente endotermica mentre la reazione di shift del gas d'acqua è leggermente esotermica. Il calore generato durante la reazione di separazione della CO₂, che è una reazione esotermica, potrà fornire in tal modo calore alla reazione di SMR riducendo il calore fornito dall'esterno all'intero processo. Si propone, con questa attività, la possibilità di produrre H₂ nella piattaforma ZECOMIX, attraverso l'impiego di particelle multifunzionali composte sia da grani di CaO che grani di catalizzatore di SMR.

La perdita di capacità sorbente del CaO in operazioni multi-cicliche risulta essere il principale svantaggio di questa tecnologia soprattutto in un materiale composito come quello qui studiato, in cui i grani di materiale sorbente devono mostrare una vita utile confrontabile con quella del catalizzatore impiegato. Il sorbente composto da CaO supportato da alluminato di calcio (Ca₁₂Al₁₄O₃₃) mostra un buon grado di rigenerazione ed una buona resistenza alla sinterizzazione anche in condizioni severe. Il materiale composito determinerebbe la riduzione delle resistenze alla diffusione dell'anidride carbonica, rispetto al caso di due tipologie di particelle (sorbente e catalizzatore), con un miglioramento delle prestazioni dell'intero processo: la CO₂ prodotta secondo le reazioni di SMR, verrebbe simultaneamente separata dal gas portando ad una diminuzione della pressione parziale della stessa e ad un'ottimizzazione del processo SESMR. Inoltre il calore generato durante la separazione della CO₂ verrebbe ceduto simultaneamente ai grani di catalizzatore per il reforming del metano migliorando l'efficienza del processo integrato.

È stata affrontata la modellazione di un processo di reazione e contemporanea diffusione (Simultaneous Reaction and Diffusion, SRD process) della CO₂ attraverso una particella composta da grani sferici di sorbente di CO₂ e catalizzatore di SMR per la produzione di H₂ in *single step* su matrice di alluminato di calcio. Il modello è in grado di dare indicazioni riguardo la quantità minima di catalizzatore e sorbente da impiegare nel materiale composito CaO/NiO/Ca₁₂Al₁₄O₃₃ ottimizzandone, quindi, il processo di sintesi. Pertanto è stato portato avanti uno studio parametrico sul rapporto ottimale tra materiale sorbente e catalizzatore dando quindi indicazioni sulla sintesi di

questo materiale: in particolare è stato mostrato come la porosità locale all'interno della particella varia con il variare del suddetto parametro. È stato trovato, quindi, il valore minimo della quantità di sorbente al di là del quale la porosità all'interno della particella assume un valore nullo impedendo quindi la diffusione all'interno della stessa. Inoltre, quando la particella di sorbente tende a valori nulli della porosità, i grani di catalizzatore, che si suppongono essere uniformemente distribuiti in tutto il suo volume, si troveranno inglobati in uno strato di CaCO_3 impedendo quindi la riduzione del nichel per la successiva attivazione dell'agente catalizzante. La porosità tende a valori nulli quando la quantità di CaO all'interno della particella aumenta. Un aumento dei grani di CaO comunque ha un effetto positivo sul processo SESMR esaltando la conversione di CH_4 in H_2 . Quindi, in questo lavoro è stato condotto uno studio parametrico al variare della quantità di fase attiva (CaO) trovando un valore del rapporto tra CaO e matrice inerte di circa il 55% di CaO che da un lato garantisce una buona produzione di H_2 e dall'altro non comporti una eccessiva riduzione della porosità durante il processo di carbonatazione.

ENEA ha sviluppato un modello per lo studio parametrico, utile ad una possibile sintesi di questo materiale. In questo ambito l'Università dell'Aquila, Dipartimento Ingegneria Industriale, ha arricchito il modello ENEA, integrando la cinetica di reforming del metano. I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/266.

Sono state effettuate sempre nei laboratori dell'Università dell'Aquila, analisi di laboratorio (XRD, BET e SEM) per indagare le proprietà chimico-fisiche dei sorbenti a base di ossido di calcio sintetizzati artificialmente, sia dopo la fase di assorbimento della CO_2 sia al termine dell'intero ciclo di assorbimento/rigenerazione (rapporto RdS/2013/210). Le prove XRD sono state estese anche a campioni di dolomite destinata ad essere utilizzata, in ZECOMIX, nel reattore di decarbonizzazione del gas di sintesi (sorbente della CO_2) e, come additivo, nel gassificatore (catalizzatore delle reazioni di gassificazione). Le analisi XRD hanno permesso di individuare le fasi presenti nei singoli campioni e di stimarne la relativa percentuale. Attraverso le analisi porosimetriche, invece, è stato possibile determinare i valori di area superficiale specifica, di volume poroso e di diametro medio dei pori dei sorbenti analizzati.

Infine il materiale sintetico $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ è stato testato in un analizzatore termo-gravimetrico nei laboratori di ENEA e sottoposto a 1000 cicli di separazione CO_2 /rigenerazione del sorbente in condizioni severe (900°C e $86\%v/v \text{CO}_2$, $14\%v/v \text{N}_2$) mostrando una buona capacità di rigenerazione (Figura 280). In particolare il materiale presenta una capacità sorbente superiore a $0,15 \text{ gCO}_2/\text{g}_{\text{sor}}$ per i primi 200 cicli, raggiunto tale valore il materiale mostra una buona stabilità, conservando queste prestazioni fino a 1000 cicli di cattura CO_2 e rigenerazione. Viene proposto quindi questo materiale come supporto a grani di nichel consentendo, quindi la produzione di H_2 in *single step*.

I risultati dell'attività ENEA sono descritti nel rapporto RdS/2013/209.

Per la produzione di ossigeno, fattore critico per la rigenerazione del materiale sintetico, si propone lo studio modellistico matematico (Università dell'Aquila) di una tecnologia a membrana perovskitica per l'apporto di una corrente di ossigeno durante le operazioni di rigenerazione del sorbente. Il successo dei reattori a membrana per la separazione dell'ossigeno dall'aria, alternativa alla produzione criogenica, è fondamentalmente legato ai recenti notevoli progressi nei metodi di produzione delle membrane (si tratta in questo caso di membrane inorganiche, prevalentemente a struttura perovskitica, in grado di operare alle temperature proprie della gassificazione e del reforming, $800\text{-}900^\circ\text{C}$), alla progettazione di reattori innovativi che consentono l'integrazione della separazione e dello scambio di energia, alla riduzione delle resistenze per il trasferimento di materia e di energia termica, alla notevole semplificazione dell'housing delle membrane all'interno del reattore. Si sono calcolati i valori di permeazione e di pressione ai due lati della membrana, considerando un sistema geometrico caratterizzato da 150 membrane di altezza pari a 10 cm inserite verticalmente nel reattore. Il modello sviluppato può essere in seguito adattato anche per simulare l'apporto di ossigeno durante operazioni di ossicomustione per la rigenerazione del sorbente solido a base di CaO. I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/265.

Test sperimentali su piattaforma ZECOMIX.

Gassificatore

La transizione verso un'energia a basse emissioni di anidride carbonica impone un utilizzo sempre più sostenibile e pulito dei combustibili fossili. Nell'autunno 2012 hanno avuto inizio alle prime prove sperimentali sulla

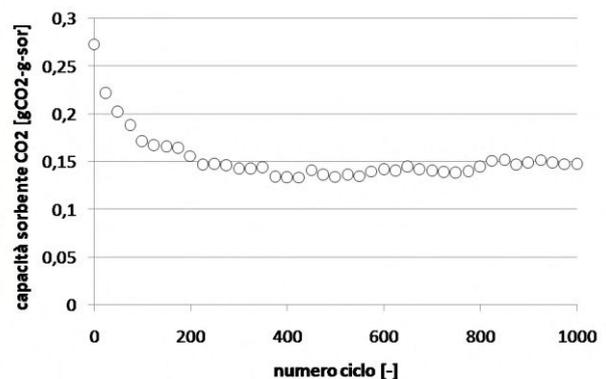


Figura 280. Capacità sorbente del materiale sintetico $\text{CaO}/\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ sottoposto a cicli di cattura CO_2 (600°C , $14\% \text{CO}_2$) e rigenerazione del sorbente (900°C , $86\% \text{CO}_2$)

piattaforma sperimentale *Zero Emission Coal Mixed Technology ZECOMIX* (ENEA) propedeutiche alla gassificazione del carbone e la successiva decarbonizzazione del gas combustibile prodotto. Tale tecnologia permette di utilizzare un combustibile fossile come il carbone per la produzione di vettori energetici puliti come l'idrogeno e l'energia elettrica, rendendola particolarmente interessante per i prossimi scenari energetici. Il processo di gassificazione avviene attraverso un reattore a letto fluido bollente da 50 kg/h di carbone in condizione autoterma in cui il mezzo gassificante è quindi una miscela di H₂O e O₂. La reazione esotermica tra carbonio e O₂ serve a fornire il calore necessario per far avanzare le reazioni endotermiche per la gassificazione del carbone. Il materiale del letto è composto prevalentemente da olivina (doppio silicato di ferro e magnesio) granulare. L'olivina agisce anche da catalizzatore per le reazioni di reforming di tar che si vengono a formare durante il processo di gassificazione del carbone. È stata determinata la rampa di riscaldamento del reattore di gassificazione per portare la fase di sostegno (olivina granulare) ad un regime adeguato di fluidizzazione per poter iniziare il caricamento del carbone.

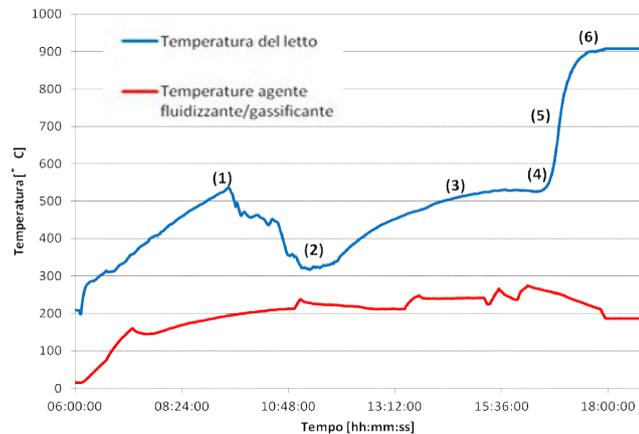


Figura 281. Prova di gassificazione del carbone: andamento della temperatura media all'interno del letto fluidizzato e della temperatura di alimentazione dell'agente fluidizzante/gassificante

La procedura di avviamento del reattore è stata così definita (Figura 281):

- *Riscaldamento del reattore*: aumento della temperatura fino 550 °C attraverso il bruciatore di metano;
- *Caricamento dell'olivina*: la temperatura del reattore inizia a decrescere (punto 1 in Figura 281);
- *Fluidizzazione del letto*: il materiale granulare inizia a fluidizzare e la temperatura del reattore aumenta (punto 2 in Figura 281).

In particolare è stata determinata l'hold-up iniziale di olivina, la portata di aria per la fluidizzazione e la temperatura di combustione del carbone. Il principale risultato ottenuto durante le prove di avviamento del gassificatore mostra come, per ottenere un buon grado di fluidizzazione, la temperatura di ingresso dell'aria di fluidizzazione debba raggiungere un valore costante tra 300 e 350 °C. Tenuto conto di questo risultato l'*Equivalence Ratio* (ER) raggiunge circa il valore di ~0,4. Da un bilancio di forze risulta che l'altezza del letto durante lo start-up, T=550 °C, e durante la gassificazione rimane circa costante a 67 cm. Infine, sono necessarie dalle 3 alle 5 ore per portare il letto da temperatura ambiente alla temperatura di 500-600°C.

Nel corso dell'annualità si è completata la procedura di start-up del gassificatore ponendo particolare attenzione alle seguenti fasi conclusive (con riferimento alla numerazione in Figura 281):

- *Caricamento del carbone* (3): i combustori ausiliari del metano sono spenti;
- *Combustione del carbone* (4): in presenza dell'aria di fluidizzazione, inizia la combustione del carbone, la portata di metano viene interrotta, la temperatura del letto presenta un marcato aumento;
- *Gassificazione del carbone* (5): alla temperatura di 700 °C la portata di aria è interrotta e la miscela di H₂O e O₂ viene inietta nel letto;
- *Condizioni di autotermicità* (6): la temperatura del letto inizia a decrescere, le reazioni di gassificazioni, il carbone viene convertito in un gas combustibile e la temperatura media del letto raggiunge un valore stabile a ~900 °C.

Carbonatatore

Nelle brevi note seguenti, si riportano i risultati sperimentali sull'avviamento della sezione di separazione della CO₂ (carbonatatore) attraverso la tecnologia del *calcium looping*, facendo uso di un letto fluido di dolomite granulare calcinata.

La tecnologia *calcium looping* fa uso della reazione tra l'anidride carbonica e l'ossido di calcio per poter superare i problemi riscontrati con l'uso dei solventi a base di ammine. In particolare l'assenza di tossicità per l'uomo e l'ambiente, la possibilità di recuperi energetici, la bassa perdita di efficienza dell'impianto (circa 6-8 punti percentuali) in cui viene innestata, fanno del *calcium looping* la tecnologia più economicamente sostenibile tra le tecnologie CCS. Inoltre l'ossido di calcio, una volta persa la sua capacità sorbente dopo un certo numero di cicli di cattura della CO₂, può essere utilizzato come materia prima nell'industria del cemento riducendo virtualmente a

zero i prodotti solidi per lo smaltimento ed aumentando ancora di più l'economicità della separazione della CO₂ attraverso il *calcium looping*.

Nel corso dell'annualità è stata ottenuta, in particolare, la curva di *breakthrough* del reattore a letto fluido durante la separazione della CO₂ ad alta temperatura (670 °C).

La prima parte della campagna sperimentale ha riguardato l'ottimizzazione del processo di riscaldamento e soprattutto di calcinazione del materiale sorbente. Quest'ultimo processo risulta, infatti, necessario per poter decomporre, in regime di letto fluidizzato, i carbonati di calcio e magnesio che compongono la dolomite nei rispettivi ossidi e iniziare in tal modo il processo di cattura della CO₂. Il letto di particelle è stato raffreddato in corrente di N₂, fino ad un valore di 650-700 °C preparando in tal modo il reattore alla cattura dell'anidride carbonica. In questo processo, l'ossido di calcio rappresenta la fase attiva del sorbente reagendo con la CO₂ per formare CaCO₃ mentre l'ossido di magnesio agisce da supporto inerte consentendo alla CO₂ di raggiungere, attraverso i pori della particella la parte interna della stessa. La concentrazione della CO₂ in ingresso al letto di sorbente è stata scelta in maniera tale da avere un contenuto di anidride carbonica che si avvicinasse il più possibile a quella misurata nei fumi di combustione.

La concentrazione di anidride carbonica misurata in uscita dal reattore ha messo in luce un abbattimento iniziale della CO₂ del 75%, con ampi margini di miglioramento. La capacità sorbente del materiale è di circa 234 g_{CO2}/kg_{sorbente}. La procedura di avviamento testata e qui sinteticamente riportata (Figura 282):

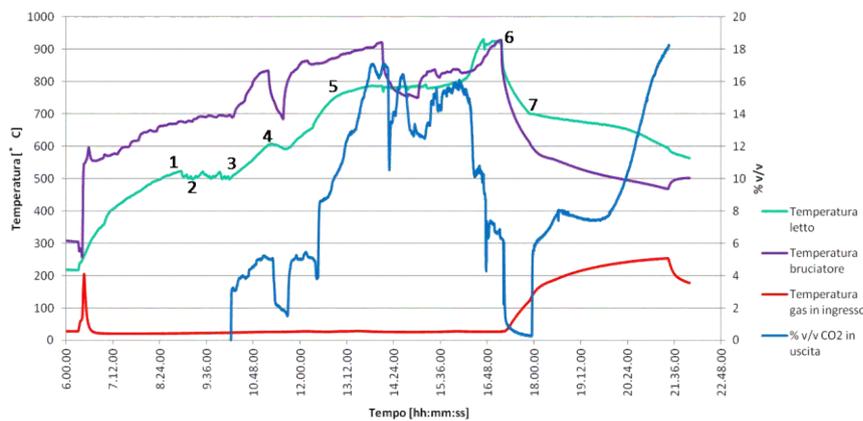


Figura 282 . Andamento della temperatura nel letto di particelle e della concentrazione della CO₂ all'uscita del reattore durante la prova di separazione della CO₂

1. *Riscaldamento* fino a 500 °C (sopra piatto distributore) attraverso i bruciatori ausiliari di metano a monte del piatto distributore. Portata del medium fluidizzante (aria e/o fumi) pari a 340 kg/h;
2. *Caricamento* della dolomite (300 kg): la temperatura all'interno del reattore inizia a diminuire fino ad assestarsi ad un valore costante di circa 500 °C;
3. *Fluidizzazione*: la perdita di carico inizia a crescere fino a raggiungere un valore costante instaurandosi un regime di fluidizzazione bollente: la temperatura inizia a crescere;
4. *Accensione dei bruciatori sopra griglia*: appena la temperatura raggiunge 600 °C sopra griglia, si accendono i bruciatori a canne immersi nel letto (in maniera tale da non avere un forte gradiente termico attraverso lo spessore del piatto distributore). Viene ridotta la portata d'aria da un valore di 340 kg/h fino ad un valore di 281 kg/h, che garantisce una velocità di 2,5 volte la velocità di minima fluidizzazione;
5. *Calcinazione*: si lascia il letto per un massimo di circa 2,5 ore a 900 °C fluidizzato con aria (portata= 90 kg/h);
6. *Raffreddamento*: a 700 °C riducendo la temperatura dell'aria attraverso il piatto distributore. Si aumenta, contemporaneamente, la portata di azoto fino ad un valore di 143 kg/h che garantisce una velocità di fluidizzazione di circa 2,5 volte la velocità di minima fluidizzazione a 700 °C). A questo punto la dolomite completamente calcinata durante lo step 5 (calcinazione), è pronta a reagire con la CO₂;
7. *Cattura CO₂*: a 700 °C avviene lo switching da aria ad una miscela di N₂ e CO₂ con una portata di 143 kg/h (composta da 103 kg/h di N₂, 40 kg/h di CO₂ che garantiscono una composizione volumetrica di 80% N₂, 20% CO₂, vicina a quella di un gas da combustione): inizia, così, la fase di cattura della CO₂ dal gas per circa 3 ore, misurandone la concentrazione a monte e a valle del letto. La fase di pre-breakthrough della cattura viene completata in circa 100 minuti. Durante questo periodo il sorbente reagisce convertendosi in carbonato di calcio. Esaurita questa prima fase la concentrazione della CO₂ all'uscita del reattore inizia a crescere mostrando che la fase attiva del processo di separazione è conclusa.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/211.

L'attività di modellazione della fase di avvio del carbonatatore, in fase di reforming del metano (la cui sperimentazione sarà oggetto del prossimo PAR) è stata curata da Università dell'Aquila, Dipartimento Ingegneria Industriale (rapporto RdS/2013/262).

Connessione della piattaforma ZECOMIX alla microturbina Turbec T100

La microturbina Turbec T100 costituisce la sezione di potenza della piattaforma ZECOMIX. La macchina è stata profondamente modificata nella sezione di combustione per ottemperare alle esigenze sperimentali peculiari della piattaforma. Nello specifico, la microturbina è stata equipaggiata con un combustore concepito per il funzionamento "dual fuel" ovvero per essere alimentata sia a gas naturale sia con un syngas ad alto contenuto di idrogeno. L'obiettivo principale della modifica consiste nell'opportunità di avviare la macchina alimentandola a gas naturale e successivamente commutare gradualmente verso l'alimentazione con il syngas prodotto dal processo implementato sulla piattaforma ZECOMIX. Il sistema di alimentazione della macchina sarà in condizione di gestire simultaneamente entrambi i combustibili, in modo tale da coprire la richiesta di potenza termica della microturbina nella fase di transizione. La T100 è stata oggetto di una profonda revisione effettuata dalla stessa casa costruttrice. Per una serie di concause, tra cui il terremoto in Emilia Romagna dove ha sede la Ditta incaricata della revisione e, non ultima, la cessione della stessa Ditta ad altra Proprietà (ANSALDO Energia), il periodo di revisione, programmato in tempi strettissimi, si è protratto ben oltre la data preventivamente concordata. Prescindendo dall'attribuzione di responsabilità laddove si tratta di fatalità inevitabili, il ritardo accumulato nella consegna della macchina ha comportato, per forza di cose, lo slittamento di tutte le attività correlate alla connessione.

I risultati complessivi dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/211.

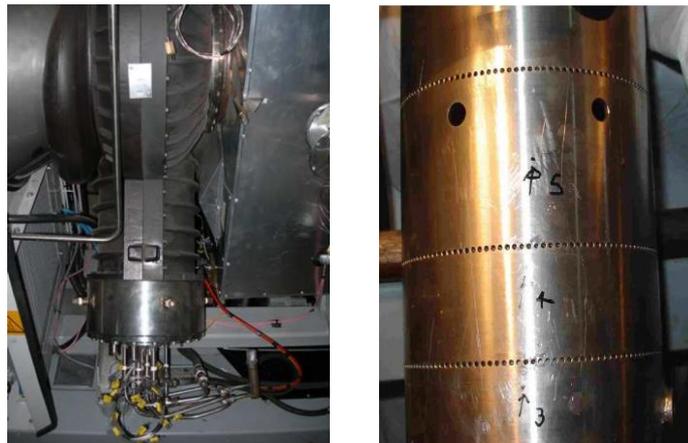


Figura 283. Turbec T100 equipaggiata con il combustore dual fuel e dettaglio del liner del combustore

c. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione e di ossi-combustione

Con riferimento alla cattura in pre-combustione e in ossi-combustione, è opportuno sottolineare come un ruolo estremamente significativo sia giocato dall'ottimizzazione del processo di combustione, nel primo caso legato all'impiego di syngas molto ricchi di idrogeno in turbo-gas, nel secondo caso in relazione all'impiego di ossigeno puro in luogo di aria come comburente. A queste problematiche intende dare risposta questo obiettivo.

c.1 Metodologie numeriche per la simulazione dei processi e la progettazione di componenti

L'attività riguarda lo studio della combustione (in ossigeno o aria), in processi monofase e multifase (combustione omogenea ed eterogenea), rivolto alla messa a punto di tecniche e modelli numerici, per simulazioni di tipo LES (Large Eddy Simulation), sviluppati all'interno del codice proprietario HeaRT, e, in relazione allo sviluppo dei metodi di simulazione predetti, lo studio delle fenomenologie di instabilità di combustione, l'individuazione di eventi precursori di instabilità e per la definizione di metodi di controllo di processo di tipo attivo o passivo.

Tutte le simulazioni svolte sono state condotte utilizzando la piattaforma di calcolo parallelo CRESCO di ENEA.

“Improvement” della tecnica IVM e studio della instabilità di combustione nel combustore PRECCINSTA

Miglioramento e validazione della tecnica denominata IVM

Nel corso della precedente annualità è stata sviluppata una tecnica originale denominata IVM (Immersed Volume Method) che consente di rappresentare e simulare geometrie complesse stazionarie in codici termo-fluidodinamici comprimibili che operano su griglie computazionali cartesiane non uniformi, con un approccio alle differenze finite ed una formulazione “sfalsata” (“staggered”) delle variabili di campo. In particolare, le celle che tagliano (“cut-cells”) una superficie complessa sono trattate con il metodo dei volumi finiti. L'approssimazione della geometria complessa per mezzo di un insieme di superfici triangolari, e non di un singolo piano tangente, garantisce una descrizione accurata della geometria tridimensionale reale. Questa tecnica è particolarmente utile nella trattazione di processi complessi come quelli propri dei fenomeni turbolenti combustivi.

Nella presente annualità la tecnica è stata notevolmente migliorata attraverso l'introduzione di una tecnica Moving Least Square per determinare i gradienti di velocità per il calcolo degli sforzi a parete nelle equazioni di trasporto della quantità di moto e per valutare, nel caso di combustione, il gradiente di specie chimiche nei flussi diffusivi. Il metodo ha consentito di incrementare l'ordine di accuratezza sulla superficie della geometria complessa rispetto ad un classico metodo Least Square.

La robustezza e l'accuratezza del metodo proposto sono state ampiamente dimostrate simulando con l'approccio LES ed il codice HearT un flusso laminare che investe una sfera a vari numeri di Reynolds (Tabella 72), un flusso turbolento che investe una sfera sostenuta da un'asta (numero di Reynolds pari a 51500), di cui una rappresentazione istantanea è riportata in Figura 284, ed una fiamma turbolenta premiscelata stechiometrica di aria e metano stabilizzata a valle di un corpo cubico (numero di Reynolds pari a 3200). I risultati ottenuti sono stati confrontati con successo con i dati sperimentali disponibili in letteratura. Per maggiori dettagli si rimanda a RdS/2013/212.

Tabella 72. Simulazione di un flusso laminare che investe una sfera. Confronto delle predizioni sul coefficiente di resistenza, la lunghezza (adimensionalizzata con il diametro della sfera) del ricircolo, e coefficiente di portanza, con i dati sperimentali e numerici di letteratura

Contributo	Re _D = 50		Re _D = 200		Re _D = 250	
	Cd	L/D	Cd	L/D	Cd	L/D
Hartmann et al. ⁹	1,568	0,410	0,764	1,456	0,698	0,065
Johnson and Patel ¹⁰	1,57	0,41	0,78	1,46	-	0,06
Marella et al. ¹¹	1,56	0,39	-	-	-	-
Kim et al. ¹²	-	-	-	-	0,701	0,059
Presente	1,566	0,408	0,765	1,457	0,700	0,063

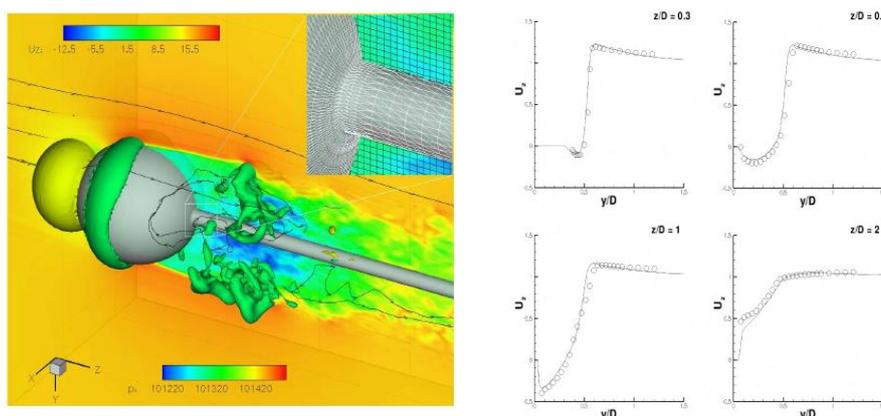


Figura 284. Campo istantaneo di un flusso turbolento che investe una sfera (a sinistra). Sono mostrati i dettagli della scia ed alcune linee di corrente. A destra, i confronti della velocità assiale predetta con quella misurata a diverse distanze

⁹ D. Heartmann, M. Meinke, W. Schroderm, „Comp. Methods Appl. Mech. Engr. 200 (2011) 1038-1052

¹⁰ T. Johnson, V. Patel, J. Fluid Mech. 378 (1999) 19–70

¹¹ S. Marella, S. Krishnan, H. Liu, H. Udaykumar, Sharp, J. Comput. Phys. 210 (2005) 1–31

¹² J. Kim, D. Kim, H. Choi, J. Comput. Phys. 171 (2001) 132–150.

Simulazioni RANS e LES del combustore PRECCINSTA mediante il codice commerciale ANSYS-FLUENT ed il codice HeaRT

Nell'ambito del progetto di ricerca europeo PRECCINSTA (PREdiction and Control of Combustion INSTabilities for Industrial Gas Turbines), presso il DLR è stata condotta una ampia campagna sperimentale avente per oggetto un bruciatore premiscelato a metano della potenza di circa 30 kW, che in alcune condizioni operative ha manifestato instabilità termoacustiche. Sono qui state condotte simulazioni RANS e LES di questo caso test ai fini di verificare le capacità predittive dei codici di calcolo disponibili in condizioni di forte instabilità.

In Figura 285 è riprodotto un disegno schematico del bruciatore. L'aria (secca) introdotta in un plenum cilindrico inferiore, procede attraverso il corpo del bruciatore seguendo i vani di un vortizzatore radiale centripeto, per poi imboccare un'intercapedine pseudo conica fungente da miscelatore ed accedere infine alla camera di combustione. Il gas combustibile (CH_4) è iniettato ortogonalmente al flusso d'aria.

Le simulazioni RANS e LES preliminari sono state effettuate con il software ANSYS-FLUENT. I risultati RANS sono solo qualitativamente in accordo con i dati sperimentali, evidenziando le limitazioni di un tale approccio stazionario ad un problema che per sua natura non lo è. Le simulazioni LES hanno invece dato risultati migliori utilizzando una griglia di calcolo ibrida di circa 4 milioni di celle. La fiamma è ancorata all'uscita dell'ugello, dove l'effetto dello swirl crea una zona di ricircolo, in cui i prodotti della combustione innescano la miscela fresca stabilizzando la fiamma, la quale assume la forma a cono (Figura 286). Le reazioni chimiche si estendono fino alle pareti della camera di combustione.

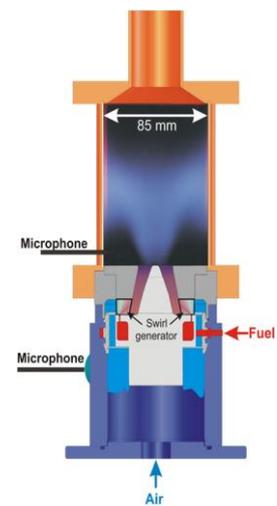


Figura 285. Sezione del combustore PRECCINSTA

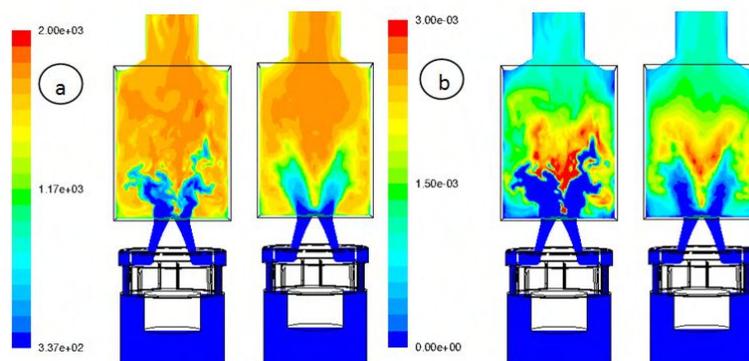


Figura 286. Campi di temperatura e di concentrazione di OH, istantanei (sinistra) e medi (destra)

Sebbene ininfluyente, un'ulteriore zona di ricircolo è presente anche attorno allo spigolo in basso della camera. I profili di temperatura e delle specie chimiche medi ricalcano molto bene i dati sperimentali nella parte esterna della fiamma, ma vi è un certo disaccordo nella parte interna. In particolare la zona calda "media" al centro sembra essere più stretta di quanto registrato sperimentalmente (Figura 287a), anche se ben catturata dal punto di vista del campo di velocità. I segnali di pressione registrati dai microfoni posizionati nella camera e nel plenum oscillano ad una frequenza di 290 Hz e sono sfasati. I due segnali registrati nelle stesse posizioni durante la simulazione hanno una frequenza dominante di circa 250 Hz (Figura 287b). Si può notare come il segnale proveniente dal plenum sia più regolare di quello proveniente dalla camera, il che risulta anche sperimentalmente. Ciò è ovviamente causato dai fenomeni connessi alla reazione e rilascio di calore. L'ampiezza d'oscillazione risulta però inferiore a quella rilevata sperimentalmente.

Il comportamento pulsato della fiamma è, come anche dimostrato sperimentalmente, attribuibile a variazioni del rapporto di equivalenza (Media 0,733, RMS 0,0616, f 235 Hz). Infatti, il miscelamento del combustibile e dell'aria all'interno del mixer non è perfetto, come risulta dal profilo del metano all'uscita del mixer. Il cattivo mescolamento, porta ad un accoppiamento tra onde di pressione e rilascio di calore e di conseguenza alle instabilità termo-acustiche del sistema. Quando la pressione si abbassa la portata d'aria aumenta e la miscela fresca non è in grado di bruciare anche a causa del ritardo di ignizione. Si formano così sacche di combustibile che risalgono la camera fino alle pareti dove bruciano allorché le velocità si sono ridotte ed è trascorso un tempo sufficiente al mescolamento. A questo punto la pressione aumenta e la portata d'aria diminuisce, generando una miscela più ricca. Pertanto è possibile concludere che le fluttuazioni di pressione ed il rilascio di calore si auto-sostengono stimolandosi a vicenda. A questo proposito si può notare come il rapporto di equivalenza vari con una

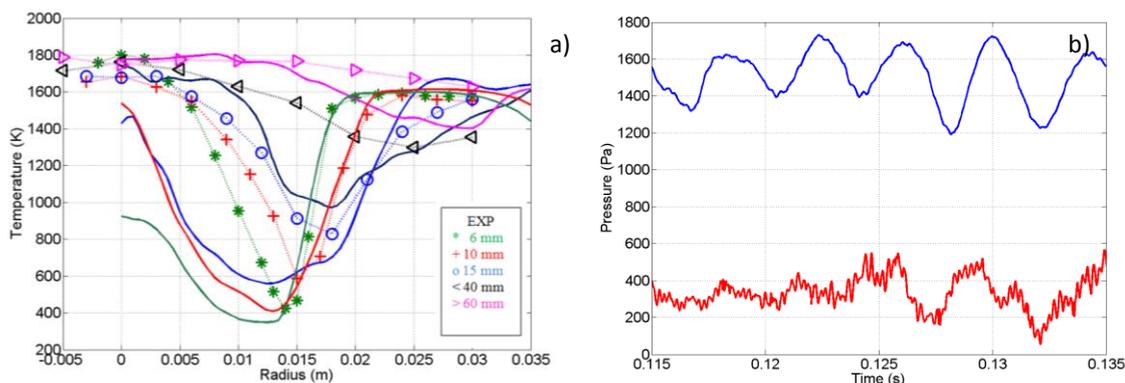


Figura 287. (a) Profili radiali medi di temperatura a diverse distanze dal bruciatore. (b) Andamento della pressione nella camera (in basso) e nel plenum (in alto)

frequenza di circa 235 Hz, prossima a quella della pressione. Stesso discorso vale per il rilascio di calore. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/213.

Per quanto riguarda la simulazione LES con il codice HeaRT, è stata messa a punto la griglia di calcolo necessaria per la simulazione LES dell'intero combustore PRECCINSTA. In particolare, il dominio computazionale copre tutte le parti essenziali da simulare per cogliere al meglio il fenomeno delle instabilità termo-acustiche: il "plenum" del combustore, cioè lo spazio a monte del bruciatore in cui viene immessa l'aria prima di essere convogliata negli iniettori del bruciatore; l'intero bruciatore, con palette ed iniettori del combustibile; la camera di combustione; il camino; parte dell'atmosfera intorno allo scarico per evitare riflessioni numeriche non fisiche delle onde acustiche all'uscita del combustore. La griglia di calcolo consta di circa 50 milioni di nodi di calcolo; il meccanismo di cinetica chimica adottato è di tipo dettagliato e prevede il trasporto di 17 specie chimiche. Il campo termo-fluidodinamico è inizializzato mediante la soluzione di primo tentativo ottenuta con il codice commerciale ANSYS-FLUENT. La simulazione non è ancora terminata e dunque il confronto con i risultati sperimentali verrà eseguito nei prossimi mesi (PAR 2013).

Questa attività (rapporto RdS/2013/213) comprende anche alcune valutazioni critiche sull'efficienza del miscelatore e su azioni volte a migliorarne il funzionamento, in vista della realizzazione di un bruciatore ENEA, ispirato al bruciatore in oggetto, da destinare a indagini sulle condizioni di instaurazione di instabilità termoacustiche in fiamme premiscelate magre o ricche di idrogeno.

Sviluppo e validazione di un nuovo modello di sottogriglia per LES

E' stato sviluppato un nuovo modello di sottogriglia per Large Eddy Simulation per trattare l'interazione turbolenza /combustione in fiamme premiscelate. Questo modello originale ha l'ambizione di cogliere a livello locale (nello spazio) i regimi di combustione messi in evidenza dal classico diagramma di combustione premiscelata che riporta, in ascissa, il rapporto tra la scala integrale della turbolenza e lo spessore del fronte di fiamma, ed in ordinata, il rapporto tra la fluttuazione rms di velocità e la velocità di propagazione laminare del fronte stesso (Figura 288). L'obiettivo del modello è quello di stimare la frazione di volume reagente all'interno di ogni singola cella di calcolo. L'espressione finale di questa frazione dipende dal rapporto tra la velocità di propagazione turbolenta del fronte di fiamma e quella laminare, e dallo spessore del fronte di fiamma. Queste due fondamentali grandezze sono modellate diversamente in funzione del regime di combustione in cui la cella reagente viene a trovarsi. Il modello proposto definisce questi regimi di combustione sulla base di tre numeri caratteristici locali: il numero di Prandtl, quello di Reynolds e quello di Damkoheler. Sono anche considerati gli effetti di diffusione preferenziale delle specie combustibili più leggere, come l'idrogeno, sulla

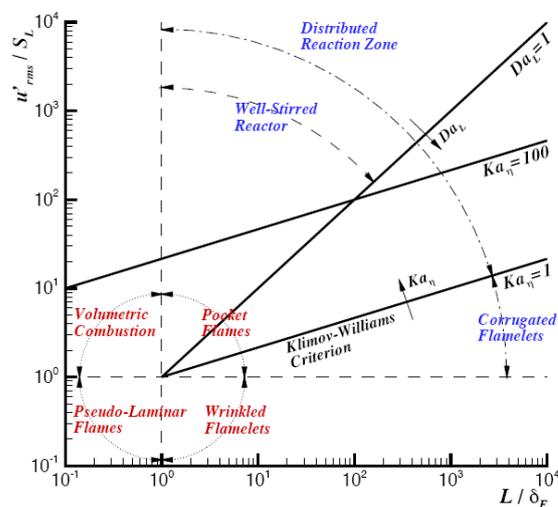


Figura 288. "Standard Combustion Diagram" relative ai regimi di combustione premiscelata

propagazione del fronte nelle regioni del flusso caratterizzate da bassi livelli di stiramento fluidodinamico. Oltre a considerare l'effetto positivo delle diverse scale turbolente sulla combustione, dovuto all'aumentato mescolamento ed eventuale inspessimento del fronte, il modello considera anche gli effetti negativi in termini di estinzione localizzata, dovuta allo stiramento del fronte di fiamma da parte dei vortici di piccola scala. Va osservato che il modello di estinzione adottato non è originale: è stato ripreso da letteratura, dopo attenta valutazione dei modelli attualmente esistenti, ed opportunamente adattato alla restante nuova modellistica. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/214.

Al momento della proposta del presente progetto, si pensava di validare il nuovo modello sviluppato al punto precedente mediante il caso test di combustione premiscelata aria/syngas del Paul Scherrer Institute (PSI) di Zurigo. In realtà i dati sperimentali relativi a tale caso sono insufficienti per una valutazione ed una validazione corretta del nuovo modello. Di conseguenza, è stato deciso di adottare inizialmente altri due casi test formalmente simili, ma aventi diversi numeri di Reynolds e quindi diversi livelli di turbolenza (i Reynolds dei getti centrali sono rispettivamente 6250 e 2100, i relativi turbolenti sono 56 e 252, costruiti con fluttuazioni di velocità $0,3 \text{ ms}^{-1}$ e 18 ms^{-1} , scale integrali di $5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ e $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, e viscosità cinematiche di $2,80 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $8,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, rispettivamente). Essi sono relativi ad una fiamma premiscelata metano aria relativa ad un bruciatore con tre iniettori a sezione rettangolare affiancati. La miscela fresca reagente esce dall'iniettore centrale, mentre dai due restanti iniettori esce a velocità ridotta una miscela costituita dai gas prodotti dalla combustione della miscela centrale (Figura 289).

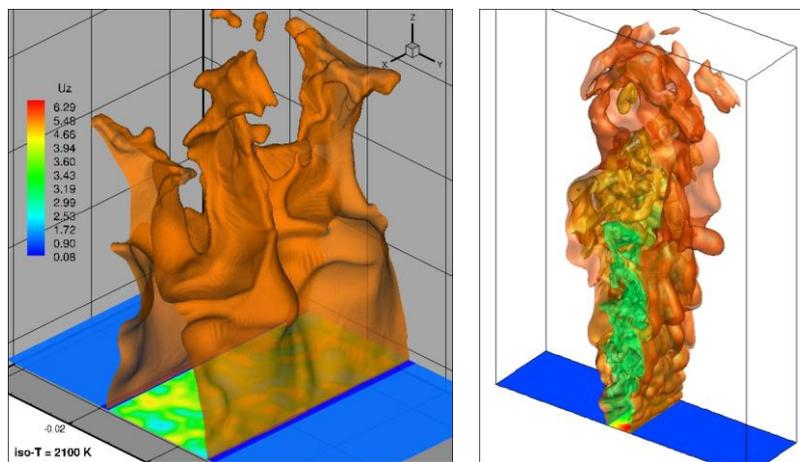


Figura 289. Iso-superficie istantanee di temperatura relativa ai casi test selezionati (il meno turbolento a sinistra) per la validazione del nuovo modello di sottogriglia. La sezione trasversale mostra l'associato campo della componente longitudinale di velocità all'ingresso, evidenziandone il carattere turbolento

Tali casi test sono più ricchi di dati con cui confrontarsi. Per la validazione occorrono una serie di simulazioni a diversi livelli di risoluzione spaziale. Le simulazioni sono ancora in corso e quindi la fase di validazione non è ancora conclusa. A valle di questa fase, si simulerà anche il combustore del PSI per focalizzare l'attenzione sugli effetti dovuti alla presenza dell'idrogeno. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/214.

Simulazione di processi di ossi-combustione

Sviluppo di una tecnica multi-livello per il codice proprietario HeaRT

Il solutore multilivello per il codice HeaRT è stato sviluppato mediante l'uso di griglie di calcolo sovrapposte, che comunicano tra loro mediante gli operatori di restrizione e prolungamento. La griglia rada trasferisce ai bordi della griglia fitta la soluzione calcolata, che viene usata dalla griglia fitta come se fosse una condizione al contorno; la griglia fitta, una volta calcolata (in maniera sicuramente più accurata) la soluzione, la trasferisce sulla griglia rada.

Il prolungamento (l'operazione di trasferimento della soluzione dalla griglia rada a quella fitta) è sicuramente il passo più delicato, in quanto un non corretto trasferimento della soluzione, sia dal punto di vista numerico che dal punto di vista fisico, pregiudica l'integrazione delle equazioni sulla griglia più raffinata e perciò peggiora, se non addirittura altera, la qualità della soluzione ottenuta. Inizialmente è stato implementato un prolungamento mediante interpolazione trilineare delle variabili conservate, che non ha però dato risultati soddisfacenti a causa della nascita di oscillazioni. Questo è ad esempio evidente nella Figura 290 relativa alla simulazione dell'esperimento di Sommerfeld e Qiu.

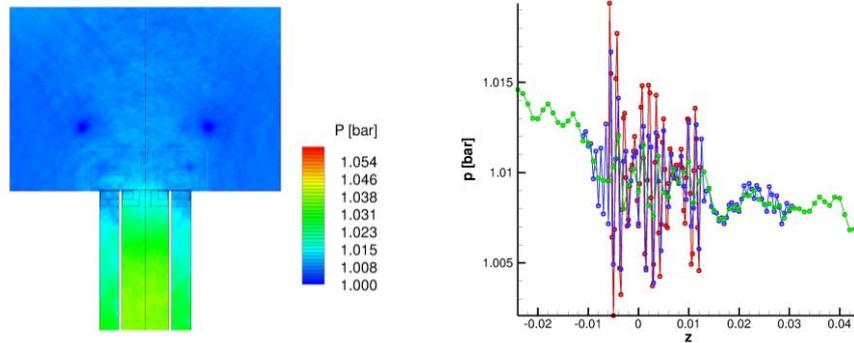


Figura 290. Campo di pressione per il caso Sommerfeld e Qiu e relativo profilo di pressione su una linea che mette in evidenza le oscillazioni spurie indotte dalla tecnica di prolungamento basata su un'interpolazione bilineare delle variabili conservate. Analogo è l'effetto dell'interpolazione trilineare dei flussi

Il prolungamento è stato quindi modificato: mediante interpolazione trilineare vengono trasferiti i flussi di massa, quantità di moto, etc. necessari all'integrazione sulla griglia fitta, in maniera tale che entrambe le griglie "vedano" gli stessi flussi. Questa nuova strategia è stata testata simulando il vortice di Rankine e un tubo d'urto monodimensionale, che hanno però ancora mostrato delle criticità nell'ottenimento della corretta soluzione: l'interpolazione trilineare, infatti, non permette un controllo sistematico sulle grandezze trasferite e non è quindi assicurata la conservazione delle variabili o dei flussi. Ciò si traduce in una diversità di soluzione tra i vari livelli di griglia, che comporta l'insorgenza di oscillazioni spurie sulla griglia a risoluzione maggiore, che le trasferisce ai livelli di griglia più radi, innescando un meccanismo a catena che porta rapidamente ad un'alterazione della soluzione numerica.

Per permettere quindi un maggiore controllo sul trasferimento della soluzione e per facilitare l'implementazione del solutore a griglie affiancate (la griglia di calcolo è formata da zone appartenenti allo stesso livello, ma che possono avere risoluzioni differenti), è in corso di implementazione la tecnica del *least squares* per interpolare al terzo ordine le variabili conservate sui bordi della griglia a risoluzione maggiore: mediante questo metodo è possibile imporre che durante l'interpolazione gli integrali delle grandezze trasferite sui volumi di controllo non vengano modificati, evitando così l'introduzione di errori numerici che pregiudicano una corretta integrazione delle equazioni di conservazione. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/215.

Quest'attività è stata oggetto dell'accordo di collaborazione con l'Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale.

Simulazione del combustore a polverino di carbone FLOX-COAL

L'ossidazione è una tecnologia relativamente nuova per l'applicazione energetica, che ha ancora bisogno di attività di ricerca per l'ottimizzazione dei dispositivi industriali e la Computational Fluid Dynamics (CFD) è uno degli strumenti indispensabili per la loro progettazione. L'approccio LES (Large Eddy Simulations) è il più indicato per lo studio di queste fenomenologie, sebbene ancora sia estremamente costoso dal punto di vista computazionale. Al fine di ridurre il costo computazionale di questo tipo di applicazioni, si procede qui ad effettuare una serie di simulazioni di tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) con il codice ANSYS-FLUENT. In particolare, è stata effettuata un'analisi termo-fluidodinamica di un impianto pilota (FLOX-COAL) alimentato a polverino di carbone. Le analisi termo-fluidodinamiche giocano un ruolo fondamentale nella comprensione dei meccanismi che sono alla base della produzione di inquinanti. Solitamente nelle simulazioni della combustione di polverino di carbone non si tiene conto delle reazioni di gassificazione legate alle specie CO_2 e H_2O , in quanto il loro contributo alla ossidazione del char è trascurabile rispetto al meccanismo di ossidazione legato all' O_2 . Nelle condizioni di funzionamento simulate (che si dovrebbero avvicinare ad una situazione di combustione flameless), a causa del forte ricircolo di gas caldi e parzialmente combusti nella zona primaria di combustione, tali reazioni divengono importanti. In questa situazione, quindi, le suddette reazioni di gassificazione devono essere tenute in considerazione. L'attività di modellistica è molto importante ed è un potente ausilio al fine di indagare le condizioni di esercizio migliori. In questa ottica, presso i nostri laboratori di termo-fluidodinamica computazionale, sono state svolte le simulazioni descritte nel rapporto RdS/2013/216. Le simulazioni hanno mostrato che un'opportuna scelta della configurazione degli ugelli dell'aria secondaria e dell'iniettore del polverino di carbone, unitamente ad una geometria che promuova un ricircolo interno, conducono ad una situazione nella quale si hanno dei campi termici sostanzialmente omogenei (Figura 291). Questa omogeneità, o meglio l'assenza di picchi di temperatura, fa in modo che la produzione di specie inquinanti sia molto contenuta, soprattutto all'uscita del combustore.

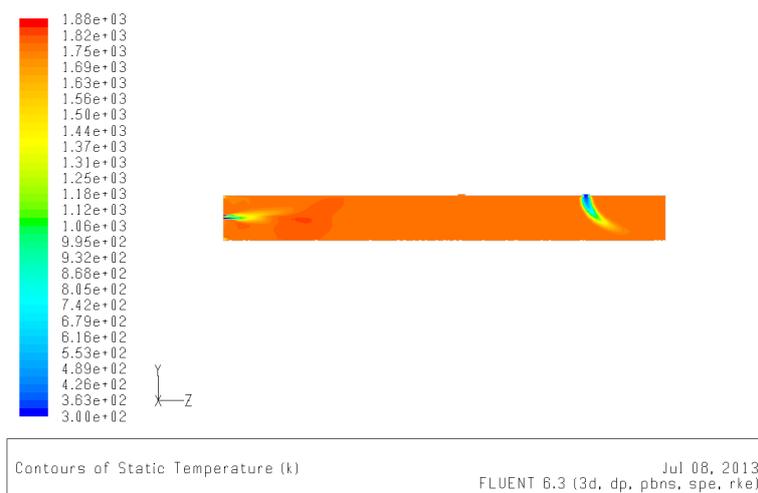


Figura 291. Campo di temperatura predetto all'interno del combustore FLOX-COAL

Sviluppo e test di schemi cinetici per la volatilizzazione ed ossidazione del carbone

Sui temi fondamentali della cinetica chimica di ossidazione del carbone, sono state modellate, nell'ambito di una collaborazione con il Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica e Materiali, le reazioni in fase gas dei prodotti rilasciati durante la volatilizzazione del carbone, e i relativi meccanismi cinetici di pirolisi e ossidazione.

È noto che il carbone, durante la fase di pirolisi, rilascia una vasta gamma di specie chimiche in fase gas (frazione volatile) ed in fase solida (char). La frazione volatile è costituita da una miscela di composti ossigenati inorganici come H_2O , CO , CO_2 , da una miscela di idrocarburi a basso peso molecolare come H_2 , CH_4 , C_2H_4 e da una miscela di idrocarburi ad alto peso molecolare denominata tar. Le specie volatili, una volta rilasciate in fase gas, sono coinvolte in reazioni secondarie di pirolisi e di ossidazione. Il residuo solido char è una matrice carboniosa porosa ad alta area superficiale costituita da carbonio, idrogeno, azoto, zolfo, ossigeno e ceneri. In presenza di reagenti gasificanti, il char dà luogo a reazioni eterogenee di ossidazione e di gassificazione.

Il processo di pirolisi ed ossidazione del carbone è complesso non solo da un punto di vista chimico ma anche da un punto di vista fisico dal momento che coinvolge fenomeni che avvengono sia alla scala della particella sia alla scala del reattore.

Durante il rapido riscaldamento delle particelle di carbone, come accade nei reattori a flusso trascinato o nei forni a polverino di carbone, la devolatilizzazione e l'ignizione hanno un ruolo fondamentale nel caratterizzare il comportamento delle fiamme (stabilità, formazione di inquinanti, estinzione). L'ignizione delle particelle di carbone è influenzata non solo dalle condizioni operative (temperatura, pressione, composizione comburente) ma anche dal rango del carbone. A basse concentrazioni di ossigeno (< 50%) i carboni bituminosi mostrano la presenza di due fasi di combustione differenti, la prima relativa alla combustione dei volatili e la seconda relativa alle reazioni eterogenee. Ad alti valori di ossigeno (> 50%) l'ignizione non avviene più per combustione della fase volatile ma si ha la contemporaneità delle due fasi di combustione. Il comportamento dei carboni lignitici and antracitici è meno influenzato dalla concentrazione di ossigeno manifestando una simultaneità delle due fasi di combustione. E' evidente come il diverso comportamento non è solo una conseguenza della differente quantità di volatili rilasciata ma soprattutto della diversa composizione.

Una modellazione accurata ed affidabile, in grado di descrivere il comportamento delle particelle di carbone, richiede non solo la caratterizzazione della fase di pirolisi che definisca la quantità e la composizione della fase gas ma anche la caratterizzazione dei meccanismi cinetici nei quali queste specie sono coinvolte. In quest'ottica è stato sviluppato un meccanismo cinetico ridotto di pirolisi e di ossidazione delle specie volatili formato da 47 specie chimiche (molecolari e radicaliche), da C_0 a C_{14} , coinvolte in 415 reazioni.

Il modello cinetico semplificato è stato sviluppato analizzando i flussi di formazione e consumo, predetti dallo schema cinetico dettagliato, delle specie volatili coinvolte nella pirolisi del carbone in differenti condizioni di temperatura e stechiometria. Sulla base del valore assoluto dei flussi di ciascuna specie è stato possibile individuare le specie più importanti e gli step cinetici dominanti. I parametri cinetici di ciascuna reazione mantengono la consistenza con i parametri cinetici del meccanismo dettagliato.

Infine il modello semplificato è stato confrontato sia con dati sperimentali di velocità di fiamma sia con il modello dettagliato ottenendo un accordo più che soddisfacente. Inoltre la struttura dello schema cinetico lo rende facilmente utilizzabile in codice fluidodinamici come FLUENT e/o OpenFOAM.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/217.

c.2 Sviluppo, progettazione e test di bruciatori per turbine a gas

Questo task affronta la problematica dello sfruttamento energetico, efficiente e a basse emissioni, del syngas prodotto da gassificazione, e più in generale di gas naturale.

Ottimizzazione del bruciatore trapped vortex denominato ETVB-Mod1, attraverso sperimentazione su impianto MICOS e simulazioni CFD

L'attività di ricerca, svolta in collaborazione dall'ENEA e dalla Sezione di Aerodinamica e Termo- Fluidodinamica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università Roma TRE, è stata mirata allo studio numerico e sperimentale dell'aeroacustica del combustore non convenzionale di tipo trapped vortex, denominato ETVB-Mod1 (ENEA Trapped Vortex Burner - Modello1), il cui progetto è stato sviluppato nelle precedenti annualità.

L'attività di ricerca numerico-sperimentale si è concretizzata nello sviluppo e finalizzazione delle tre attività di seguito elencate:

1. Caratterizzazione acustica del bruciatore TVC mediante simulazione numerica FEM
2. Caratterizzazione sperimentale dell'aeroacustica del bruciatore TVC a freddo ed in condizioni reattive;
3. Supporto allo sviluppo del software di acquisizione, e post-processing dei dati e collaborazione allo studio di fattibilità per la realizzazione di un sistema per misure anemometriche utilizzando la tecnica denominata Particle Image Velocimetry (PIV).

Il lavoro è stato svolto in parte presso i laboratori dell'Università, e in parte presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia dove è presente un nuovo modello di bruciatore ETVB-Mod1 installato sull'impianto MICOS (Multipurpose Installation for COMbustion Studies).

Il comportamento acustico di un modulo del TVC è stato analizzato utilizzando un modello 3D agli elementi finiti implementato nel codice di calcolo commerciale COMSOL che ha consentito la determinazione dei modi acustici propri. Il primo modo acustico, essendo quello maggiormente energetico e quindi fortemente indesiderato perché causa di innesco di instabilità termoacustiche, è stato analizzato approfonditamente. È stata introdotta una relazione analitica in grado di predirne la frequenza tenendo in considerazione lo sviluppo del primo modo nel dominio esterno. In Figura 292 si può apprezzare l'ottimo accordo tra la frequenza calcolata attraverso la relazione analitica corretta e le frequenze ottenute attraverso un test modale sperimentale effettuato su un modello di laboratorio.

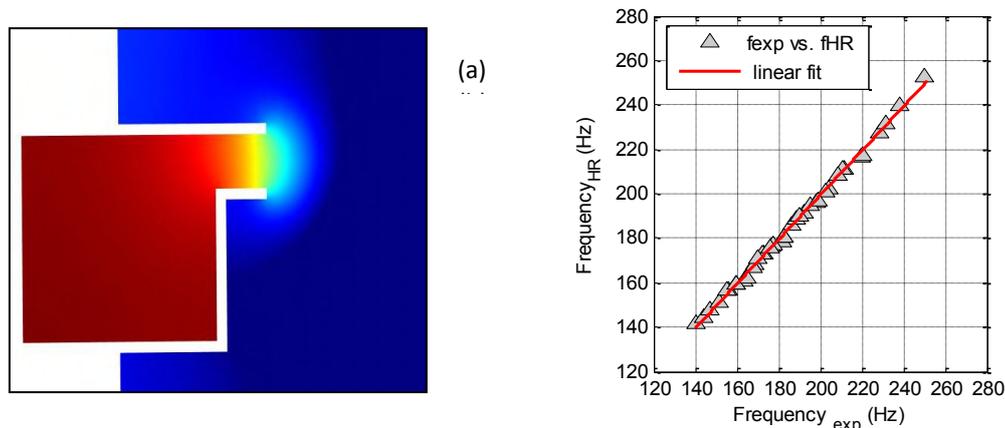


Figura 292. a) Campo di pressione associato al primo modo acustico determinato numericamente; (b) Frequenza del primo modo del TVC predetta analiticamente in funzione della stessa frequenza misurata sperimentalmente

Il comportamento aeroacustico del TVC a freddo ed in condizioni reattive, è stato determinato sperimentalmente attraverso una serie di campagne di misura effettuate sull'impianto MICOS. In una prima fase si è verificato il set-up sperimentale esistente e si è cercato di apportare opportuni miglioramenti e proponendo nuove soluzioni, sulla

base di recenti studi di letteratura. Successivamente dopo aver pianificato una test matrix, si è proceduto all'acquisizione dei dati in varie condizioni di funzionamento ed al loro post-processing.

Particolarmente critiche sono risultate le misure delle fluttuazioni di pressione a parete. Per misure di pressione in ambienti ad alte temperature è infatti necessario posizionare lo strumento lontano dalla fonte di calore al fine di evitare possibili danneggiamenti. E' stato utilizzato un trasduttore di tipo Kulite collegato al combustore con un sistema tubo - guida d'onda attraverso un foro praticato in sede progettuale sulla parete inferiore del TVC. Uno studio analitico e numerico (mediante FEM) è stato condotto preliminarmente per caratterizzare questa geometria dal punto di vista acustico determinandone la risposta in frequenza. E' stata inoltre progettata e realizzata una nuova piastra di acciaio su cui sono posizionate diverse prese di pressione dotate di sistemi tubo - guida d'onda opportunamente progettati. La piastra strumentata è ora in fase di installazione sull'impianto. La pressione acustica è stata monitorata anche attraverso dei microfoni posizionati all'esterno del modello. In questo modo è stato possibile individuare delle componenti modali delle fluttuazioni di pressione a parete legate all'innesco dei modi acustici distinguendole dalle fluttuazioni di pressione di natura idrodinamica. Il set-up di misura ha previsto quindi l'utilizzo di un trasduttore di pressione a parete, due microfoni esterni ed una telecamera utilizzata per monitorare le condizioni di flusso. Inoltre, al fine di avere informazioni statistiche sull'andamento delle velocità ed aver modo di correlarle con le pressioni, sono state condotte alcune prove preliminari utilizzando due sensori ODC, un trasduttore di pressione collegato alla parete ed un microfono esterno.

Le campagne di misura sono state finalizzate alla ricerca ed alla caratterizzazione delle condizioni di transizione e di innesco delle instabilità termoacustiche del combustore. Sono stati variati i valori di portata di aria primaria, portata di aria secondaria, portata di gas metano e temperatura dell'aria in ingresso, per consentire di parametrizzare i risultati in termini di potenza termica e rapporto di equivalenza. In Figura 293 si riporta un esempio di spettri di potenza ottenuti processando le fluttuazioni di pressione a parete. Le curve riportate sono parametrizzate in funzione del rapporto di equivalenza. Come si può notare, sono presenti dei picchi che, attraverso il confronto con i dati ottenuti dai microfoni esterni, sono stati interpretati come dovuti a effetti di natura acustica in particolare legati al primo modo di risonanza della geometria. Si può osservare infatti che i valori della frequenza associata al picco più energetico sono in buon accordo con la predizione analitico-numerica ottenuta a freddo (Figura 292). E' attualmente allo studio un modello analitico per la correzione della formula di predizione della frequenza del primo modo acustico per tenere conto anche degli effetti della temperatura.

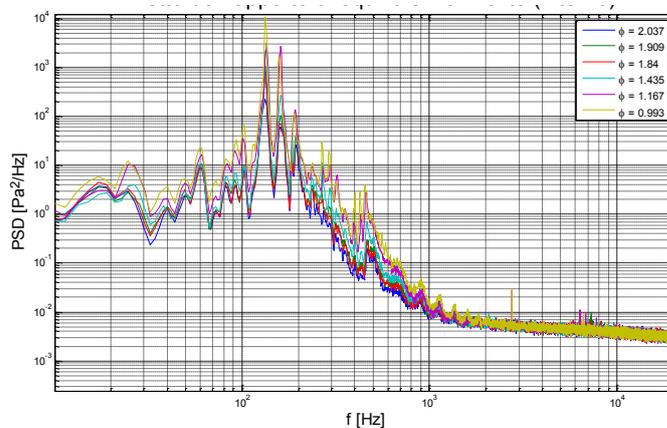


Figura 293. Power Spectral Density del segnale di pressione a parete al variare del rapporto di equivalenza a parità di potenza

Nel processo di messa a punto del set-up sperimentale l'Università ha contribuito al miglioramento del software di acquisizione ed analisi dati in dotazione ai laboratori ENEA, suggerendo l'inserimento di nuove funzioni di post-processing in grado di analizzare segnali in pressione dal punto di vista aeroacustico. Si è inoltre valutata la possibilità di effettuare delle misure utilizzando la tecnica PIV. I problemi legati alla difficoltà di iniezione del flusso ed all'oscuramento dell'ambiente circostante, rendono però questa tecnica poco applicabile. Nel futuro, si focalizzerà l'attenzione sull'utilizzo della tecnica ODC per la stima delle proprietà statistiche della velocità locale e sullo sviluppo di tecniche di image processing per la determinazione di campi di velocità attraverso l'analisi dell'energia radiante e senza l'utilizzo di particelle iniettanti.

I risultati di questa attività sono illustrati nel rapporto RdS/2013/218, ove, nei limiti imposti da una stretta collaborazione tra partner, si è cercato di porre in luce i rispettivi contributi.

Nel corso dell'attività, è stato eseguito da ENEA, anche uno studio CFD, sia RANS che LES (Figura 294), del modello semplificato del bruciatore ETVB-Mod1 attualmente disponibile, sul quale sono state eseguite varie misure a freddo, utile anche ad evidenziare alcune caratteristiche peculiari del moto all'interno della camera di combustione.

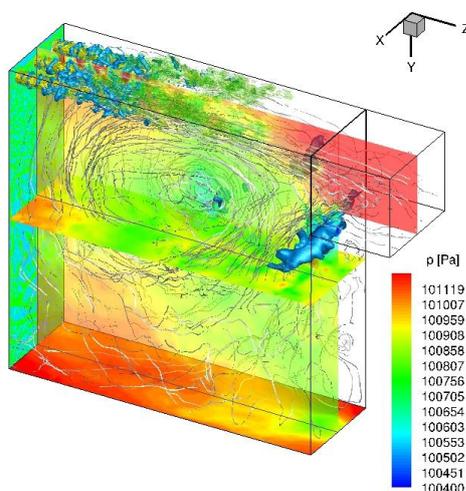


Figura 294. Campo istantaneo offerto dalla LES del TVC non reattivo. I piani riportano le mappe di pressione, le isosuperfici di velocità mettono in evidenza i tre getti con le strutture toroidali che si staccano dagli iniettori. Le linee di corrente evidenziano il vortice intrappolato nella cavità

Si proceduto a questo punto con delle simulazioni a caldo per verificare il comportamento del bruciatore nel passaggio dal modello già in dotazione ad uno avente la forma di un settore circolare di una camera di combustione anulare. Si ricorda infatti che per ragioni pratiche e di realizzazione dell'oggetto, ci si era orientati verso la costruzione di un bruciatore sperimentale rettificato. A conferma della scelta iniziale, non si evidenziano particolari differenze, né in termini di posizionamento del vortice e velocità, né in termini di livelli di temperatura raggiunti (Figura 295).

Non avendo ancora a disposizione l'alimentazione a syngas per l'apparato sperimentale, si è cercato di ottimizzare il prototipo nel caso di alimentazione a metano, studiando ulteriori configurazioni per ciò che riguarda la disposizione degli ingressi dei fluidi soprattutto. Essendo il potere calorifico decisamente superiore, e di conseguenza le portate inferiori a pari potenza, si è pensato di ridurre il numero di fori di immissione del combustibile, dato che l'impianto sperimentale consente agevolmente tale modifica. La risposta migliore si è ottenuta lasciando aperta solo la linea di fori di immissione del combustibile disposta in mezzo alle due file di aria primaria per ogni lato. In particolare dal punto di vista delle emissioni si è individuata una condizione ottimale per ciò che riguarda i valori di portata, a cui corrisponde il seguente indice di emissione $EICO=4,28$ $EINOx=7,1$ g/kg_{metano} .

I risultati di questa attività sono illustrati nel rapporto Rds/2013/260.

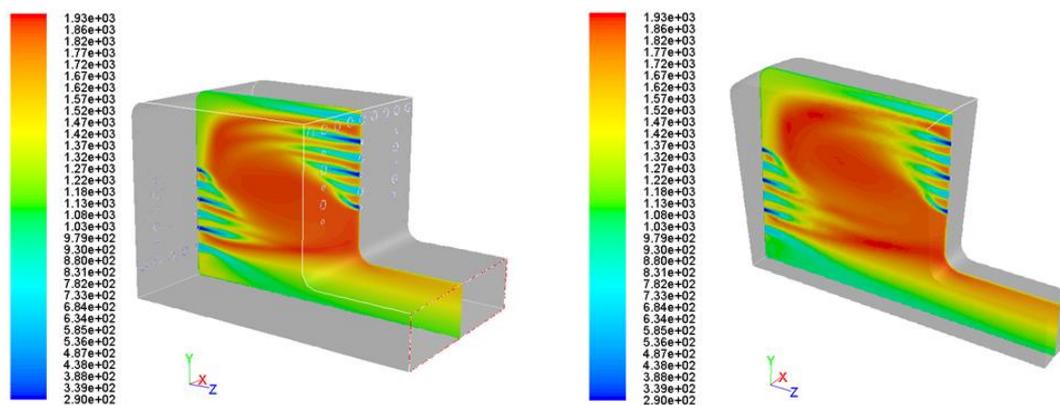


Figura 295. Distribuzione di temperatura (K) nel settore rettificato e nel settore anulare

Interventi migliorativi apportati a bruciatori convenzionali di turbo-gas per ampliare la “load-flexibility”

Al fine di ampliare l’intervallo di funzionamento stabile, e quindi la load-flexibility di bruciatori convenzionali per Turbo-Gas, è stata effettuata una sperimentazione sul bruciatore della Ansaldo V64.3A (Figura 296) installato sull’impianto COMET-HP (*COMbustion Experimental Tests in High Pressure conditions*).

Il bruciatore V64.3A presenta una lancia centrale che alimenta la fiamma diffusiva pilota circondata dal vorticolatore diagonale da cui fluisce il flusso premiscelato. Come mostra la figura, dalla cassa d’aria si alimentano direttamente sia il vorticolatore periferico diagonale (*diagonal swirler*), alla cui luce d’ingresso è applicata una griglia anulare in grado di smorzare le instabilità, sia quello assiale più interno (*axial swirler*).

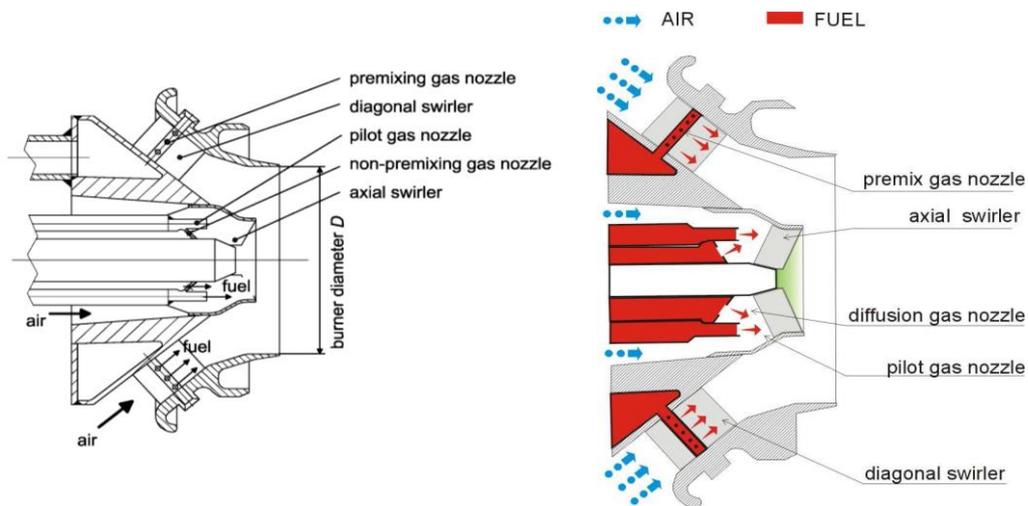


Figura 296. Schema di un bruciatore Ansaldo V64.3A

La sperimentazione, eseguita a varie condizioni di funzionamento, ha permesso di ottenere alcuni interessanti risultati che hanno portato a modificare il bruciatore tradizionale, incrementandone la stabilità e la flessibilità. Mediante una modifica, nel seguito descritta, si è ottenuta una fiamma di tipo “*Colorless Distributed Combustion*”, totalmente premiscelata, ultra magra, distribuita e non affetta da instabilità.

La sperimentazione effettuata inoltre ha fornito le basi teoriche e sperimentali per migliorare il sistema di diagnostica avanzata non invasiva ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*).

Il sistema ODC ha un pressoché nullo livello di intrusività, necessita di accessi ottici con diametro dell’ordine dei millimetri, e gode di una elevata immunità verso la rumorosità elettromagnetica, l’aggressività chimica e l’alta temperatura di operazione. Il processo viene osservato con sonde ottiche passive, chimicamente inerti ed operative fino ai 1800°C. Per queste sue caratteristiche esso si mostra particolarmente adatto al monitoraggio di camere di combustione in impianti energetici o di trattamento termico.

Le prove sono state eseguite mediante l’uso contemporaneo della tecnica ODC e dei trasduttori di pressione (Figura 297).

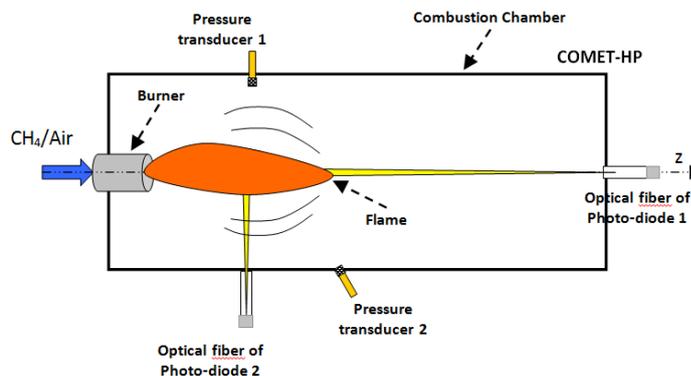


Figura 297. Schema del set-up utilizzato per lo studio del bruciatore V64.3A esaminato in questo lavoro e inserito nell’impianto COMET-HP. Dal suo schema è possibile osservare il posizionamento di due sonde ODC e di due trasduttori di pressione Kulite

Per realizzare con il bruciatore V64.3A (tradizionale per le Turbine a Gas ANSALDO omonime) una *combustione distribuita* ed ampliarne il campo di funzionamento stabile e flessibile, si è pensato di sopprimere la fiamma pilota diffusiva, inviando parte del gas ad essa originariamente destinato, sempre attraverso la linea dell'olio premix, anche nel vorticatore assiale (frecche in verde di Figura 298 e gialla in Figura 299).

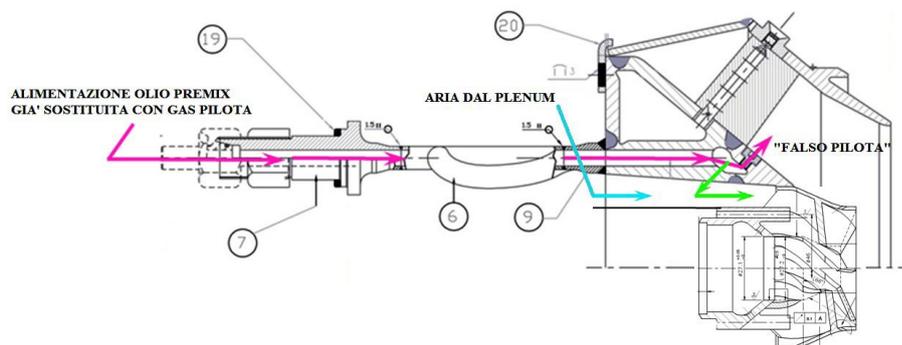


Figura 298. Modifica del bruciatore V64.3A per la stabilizzazione del regime di combustione distribuita

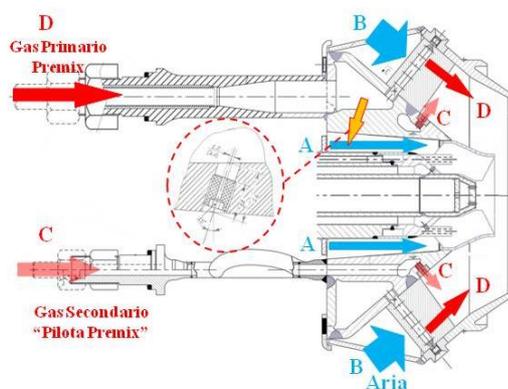


Figura 299. Modifica del bruciatore V64.3A per la stabilizzazione del regime di combustione distribuita, o meglio in un "Ultra Lean Colorless Distributed Combustor". Dallo schema è possibile individuare il percorso dell'aria che fluisce nei vorticatori centrali (A), quello dell'aria che fluisce nei vorticatori periferici (B), il gas secondario iniettato a valle dei vorticatori periferici (C) e il gas primario (D)

Praticando una corona di fori, si è creato un terzo stadio premiscelato centrale, capace di attenuare, per mezzo della fiamma che ne deriva, lo shear layer instabile tra i gas combusti generati dal vorticatore diagonale, e l'originario getto assiale d'aria swirlata. Ulteriore vantaggio è poi quello di ripristinare in parte il ruolo di sostentamento della fiamma pilota.

In altre parole eseguendo un intervento di minima entità su un bruciatore di architettura convenzionale, nota e sperimentata, se ne può estendere il campo di stabilità verso i carichi parziali, col duplice vantaggio di non dover più retrocedere verso il regime diffusivo, conseguendo tutti i benefici offerti dalla combustione *flameless*: assenza d'instabilità termoacustiche, quantomeno nella forma più energica direttamente impressa dalle fluttuazioni del rilascio di calore; temperature più basse ed uniformi, così da contenere il livello degli stress termici soprattutto nei primi stadi di turbina; ridotte emissioni inquinanti.

La filosofia della soluzione proposta non è molto differente, sul piano dello schema di principio, da quella di ricorrere ad un "Pilota Flameless" ottenuto annidando un bruciatore di Trapped Vortex entro uno stadio primario di architettura convenzionale.

Dalla sperimentazione effettuata, risulta che il bruciatore V64.3A, opportunamente modificato nel sistema di alimentazione, è in grado di realizzare condizioni di combustione *Flameless*, ed è particolarmente indicato per la combustione di gas naturale e di syngas a basse emissioni. Tale situazione, caratterizzata da una fiamma pressoché invisibile (detta appunto *Colorless Combustion*), si manifesta quando le scale fluidodinamiche risultano essere più piccole di quelle chimiche, quando cioè i tempi caratteristici della combustione si allungano, nella fattispecie per carenza di combustibile.

Creando nel corpo del bruciatore un'opportuna corona di fori filettati per l'alloggiamento di altrettanti ugelli si è alimentato in regime premix anche il vorticatore assiale, sostituendo così l'originario getto swirlato d'aria,

potenzialmente responsabile dell'instabilità, con un vortice di miscela già pronto ad infiammarsi ed eliminando quindi la discontinuità con i gas combusti. Con questo intervento si è riusciti:

- 1) a stabilizzare i regimi di *Colorless Distributed Combustion* stabile senza visiva ricomparsa della fiamma;
- 2) ad anticipare lo switch dall'alimentazione diffusiva a quella premix, eseguendolo già al 20% del carico termico, anziché al 40% della piena potenza, come previsto dal costruttore;
- 3) a raggiungere, senza incontrare instabilità, le condizioni operative di sovraccarico (oltre il 100% della piena potenza) suggerite da Ansaldo per indurre nel sistema instabilità.

La combustione *Colorless* risulta essere più stabile, e quindi più interessante da studiare per le finalità del progetto. Il motivo di tale stabilità è l'assenza di un unico punto d'innesco della fiamma: la combustione non si origina da una singola regione nell'intorno di un punto di ristagno, come accade nelle fiamme "diffusive" e "premiscelate". L'innesco e il sostentamento "distribuiti" permettono alle singole regioni della fiamma di rimanere indipendenti; ossia non in grado di esercitare l'una sull'altra mutui trascinamenti verso un'instabilità d'insieme.

La combustione *Flameless* produce diversi radicali (OH^\cdot , $\text{H}_2\text{CO}^\cdot$, CH^\cdot) che presentano alcuni grandi picchi di emissione spontanea nel range di lunghezza d'onda tra 280 e 430 nm. Dalle prove effettuate con i nuovi APD (fotodiodi a "valanga": Avalanche Photo-Diode) risulta evidente che le dinamiche della fiamma vengono perfettamente catturate riuscendo a captare la chemiluminescenza delle specie eccitate che si concentra ed assume maggiore intensità nel campo di lunghezze d'onda compreso tra ~ 280 nm e ~ 600 nm.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/219.

d. Cicli energetici ad alta efficienza "capture ready"

Sempre con riferimento alle tecnologie CCS, l'obiettivo ha per oggetto lo studio di cicli turbogas non convenzionali, caratterizzati da elevata efficienza, a ossicombustione, operanti con miscele comburenti di tipo CO_2/O_2 , e quindi "capture ready".

A tal fine è stato realizzato l'impianto sperimentale AGATUR (Advanced GAS TURbine Rising). AGATUR è un impianto concepito per la sperimentazione su sistemi di conversione dell'energia basati su turbina a gas. L'impianto è particolarmente versato per il testing di cicli turbogas non convenzionali che utilizzano miscele gassose diverse dall'aria come fluido di lavoro. Esso è costituito da tre sezioni principali mutuamente connesse: la microturbina, il vessel ed il generatore di vapore (Figura 300).



Turbec T100 modificata per la connessione fluidodinamica al vessel. Vista lato flange di connessione e vista lato combustore



Generatore di vapore



Vessel, vista lato combustore e rampa gas

Figura 300. Sezioni impianto AGATUR

Il cuore del sistema è rappresentato dalla microturbina Turbec T100, da 100 kW elettrici, modificata per essere fluidodinamicamente accoppiata al vessel. Quest'ultimo, grazie ad un volume di circa 40 m³, può essere esercito per emulare una capacità fluidodinamica e/o generare autonomamente miscele gassose di varia composizione chimica, temperatura e pressione, anche con l'ausilio del combustore autonomo di cui è dotato. Il generatore di vapore è accoppiato alla microturbina tramite il vessel, attraverso il quale può influire sulla composizione del fluido di lavoro del ciclo turbogas, mediante iniezione di vapor d'acqua in pressione. Quella appena descritta è la configurazione "nativa" dell'impianto, il quale è stato oggetto di una serie di modifiche ed integrazioni che ne accrescono la versatilità.

L'obiettivo primario delle modifiche è l'installazione dei componenti e delle infrastrutture di servizio utili alla realizzazione di un ciclo turbogas "capture ready" alimentato a gas naturale, mediante ossicombustione in atmosfera sintetica CO₂/O₂ (Figura 301). Il riferimento alle tecnologie di cattura della CO₂ è evidente, l'idea è infatti quella di esercire la microturbina con un fluido di lavoro composto principalmente da anidride carbonica ed ossigeno comburente, ed effettuare la cattura della CO₂ generata per semplice spillamento e condensazione del vapore di combustione, senza la necessità di agenti chimici ed infrastrutture impiantistiche dedicate.

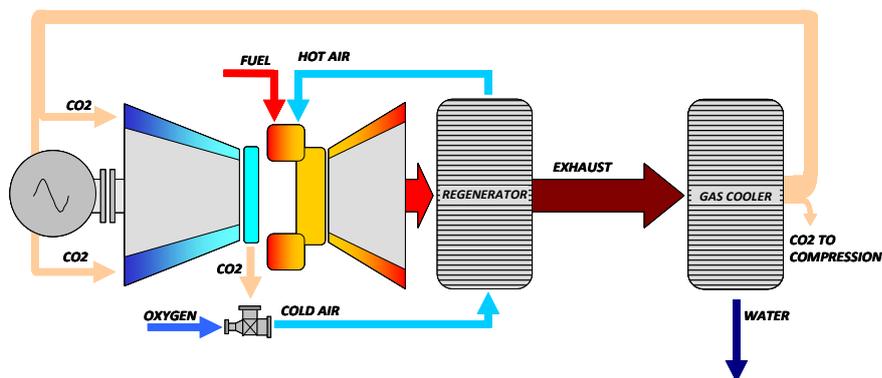


Figura 301. Schema concettuale del ciclo turbogas "capture ready"

Le sfide tecnologiche da superare sono molteplici e riguardano principalmente i diversi aspetti connessi con l'esercizio della microturbina in condizioni di funzionamento estremamente diverse rispetto a quelle per le quali è stata progettata.

Le integrazioni impiantistiche di cui AGATUR è attualmente oggetto, consentiranno di affrontare il problema con un approccio "morbido" orientato alla graduale modifica della composizione del fluido di lavoro verso concentrazioni crescenti in CO₂. Ciò avverrà riutilizzando i gas di scarico della stessa microturbina, i quali verranno raffreddati mediante scambiatore di calore e avviati verso il vessel con l'ausilio di un estrattore. La pressione del vessel sarà mantenuta ad un valore leggermente superiore alla pressione ambiente, controllandola mediante valvola di sfioro verso l'atmosfera. La microturbina, connessa al vessel dal lato aspirazione, lavorerà con una miscela gassosa che, con l'avanzare del processo, sarà sempre più concentrata in CO₂ fino al raggiungimento della condizione limite. Tale condizione coincide con la completa sostituzione del fluido di lavoro iniziale con una atmosfera sintetica formata da anidride carbonica ed ossigeno. Un approccio di questo tipo, supportato da una serie sistematica di test sperimentali, consente di identificare singolarmente i limiti del processo e, di conseguenza, di istruire le procedure per la gestione ed il controllo dello stesso.

d.1 Modifiche ed integrazioni dell'impianto AGATUR

L'obiettivo principale delle modifiche impiantistiche di cui è oggetto l'impianto AGATUR (ENEA) consiste nel dotarlo della flessibilità operativa necessaria a renderlo un banco prova per cicli di potenza di diversa configurazione, con particolare riferimento al ciclo "capture ready" già citato. Ciò richiede non soltanto una marcata flessibilità di esercizio dell'impianto ma, soprattutto, la necessità di adattare agevolmente le connessioni tra le varie sezioni del sistema alle configurazioni di ciclo che s'intendono testare sperimentalmente. Gli investimenti effettuati, nonostante le attività di modifica siano ancora in corso, hanno già consentito di ottenere dei risultati che dimostrano la validità del concetto di impianto flessibile, rapidamente adattabile a configurazioni diverse di ciclo. Il più notevole tra i risultati ottenuti è senz'altro il collaudo della microturbina ed il successivo esercizio che ha consentito di ottenere i primi dati sperimentali. Fondamentale per il raggiungimento di quanto sopra, è stata l'acquisizione ed il successivo adattamento di alcune sezioni di piping necessarie a svincolare fluidodinamicamente la microturbina dalle altre sezioni dell'impianto e, di conseguenza, ad esercirla indipendentemente dallo stato di completamento del sistema nel suo complesso. L'attrezzatura acquisita, denominata "cross-

“piping” è costituita da tre sezioni di piping in acciaio inox per alte temperature ed è stata realizzata dalla casa costruttrice della microturbina. Ciascun elemento del cross-piping ha lo scopo di ristabilire la continuità del gas-path della microturbina, laddove è stata interrotta per la connessione con il vessel.

Il cross-piping rappresenta quindi un componente ad alto livello di criticità, sia per le condizioni termo-bariche a cui è sottoposto (4,5 bar, 650 °C), sia per l’impatto che esercita sulla performance della macchina. Trattandosi di attrezzatura non standard, realizzata ai soli fini sperimentali, prima di essere installata sulla macchina è stata testata e successivamente modificata nella configurazione per migliorarne l’efficacia (Figure 302). Nello specifico, sono stati “ripensati” e realizzati i sistemi di tenuta e di irrigidimento, ottenendo un evidente miglioramento nelle prestazioni.

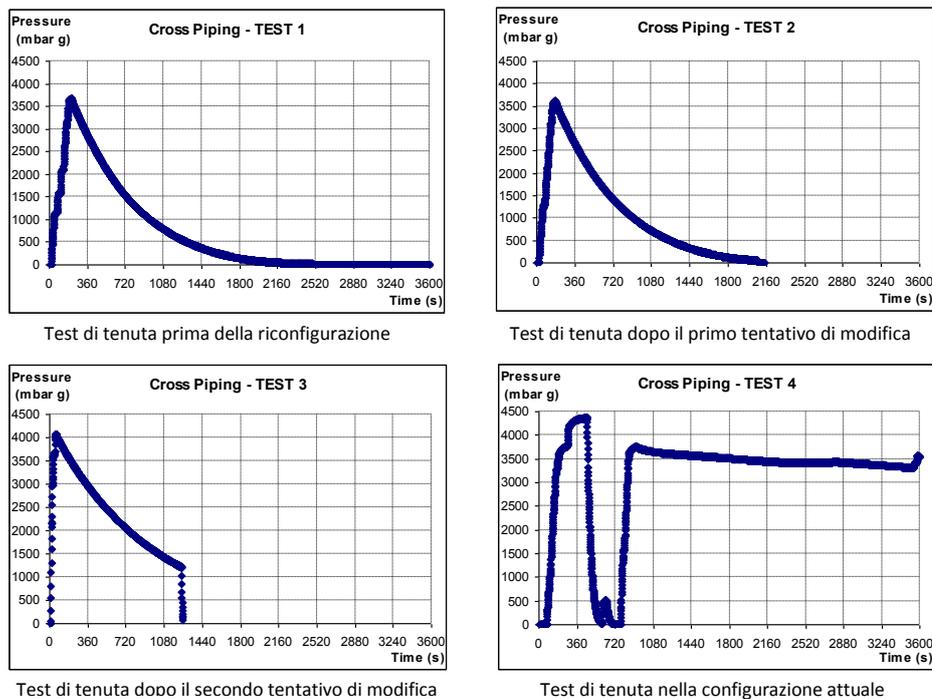


Figura 302. Test di tenuta del cross-piping

Parallelamente alle attività sopra descritte, è stata intrapresa ed ultimata la progettazione dei supporti del piping dell’impianto e del sistema di isolamento termico delle linee. Le attività di realizzazione sono sostanzialmente completate per quanto riguarda la costruzione e l’installazione dei supporti del piping, l’installazione delle linee di interconnessione vessel-microturbina e l’installazione degli expansion joints. Quanto sopra comporta, peraltro, la possibilità di intraprendere le attività relative all’isolamento termico delle linee già installate entro un orizzonte temporale molto ravvicinato. Rimangono da eseguire l’installazione delle connessioni vessel-turbina lato aspirazione e lato scarico ed il sistema di raffreddamento dei fumi, attività necessarie al completamento del loop “capture ready”.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/220

d.2 Messa in linea di una micro-TG Turbec T100

Il cuore dell’impianto AGATUR è rappresentato dalla microturbina TURBEC T100, una turbina a gas rigenerativa da 100 kW elettrici. La macchina è stata profondamente modificata nel gas-path e nel sistema di controllo, per ottemperare ai requisiti di flessibilità di esercizio richiesti. Più in dettaglio, le modifiche del gas-path hanno comportato l’interruzione dello stesso in tre sezioni, mediante le quali la microturbina può essere connessa fluidodinamicamente al vessel. Due delle interruzioni sopra citate, sono posizionate rispettivamente nei due rami di uscita lato caldo del rigeneratore, la terza è posizionata alla mandata compressore. Nella configurazione così ottenuta, la microturbina può scambiare fluidi da e verso il vessel. Nello specifico, la microturbina può cedere fluido al vessel dalla mandata compressore e dall’uscita del rigeneratore; il vessel può cedere fluido alla microturbina nella direzione del combustore.

Il sistema di controllo standard prevede che l'operatore possa controllare la microturbina essenzialmente mediante il set point di potenza elettrica, fissato il quale, tutti gli altri parametri di funzionamento vengono gestiti dal controller. La microturbina di AGATUR è equipaggiata con un sistema di controllo modificato, che consente all'operatore di gestire la macchina nella modalità standard già descritta, o di passare ad una gestione operativa basata sul controllo della velocità di rotazione e della TOT (Turbine Outlet Temperature). Questa doppia modalità di controllo rende l'esercizio della macchina più flessibile e dimostrerà la sua utilità nella transizione dal funzionamento ad aria verso fluidi di lavoro sempre più ricchi in CO₂.

La messa in linea della microturbina è stata effettuata grazie all'attuazione di una serie di attività che hanno permesso il collaudo della macchina, nonostante l'impianto AGATUR fosse in fase di commissioning. Si è provveduto preliminarmente a smontare le sezioni di piping che collegavano la microturbina al vessel. Successivamente, dopo aver completato le attività di riconfigurazione del cross-piping di cui si è già detto, è stato effettuato l'assemblaggio dello stesso a bordo macchina (Figura 303).

A causa dell'incompatibilità tra la pressione del combustibile fornito dalla rampa gas e la pressione richiesta dal sistema di alimentazione della macchina, è stato necessario intervenire su quest'ultimo, escludendo il compressore di alimentazione a bordo macchina e ricostruendo la linea di alimentazione fino alle valvole di controllo del combustore. E' stato necessario, inoltre, intervenire sul dispositivo di interfaccia che gestisce la connessione della microturbina alla rete elettrica, modificandone i parametri per adattarli alla normativa vigente.



Figura 303. La microturbina svincolata dal vessel e resa operativa mediante il cross-piping

L'impianto AGATUR è dotato di un sistema di acquisizione che consente di monitorare tutte le misure provenienti dalla strumentazione in campo. Tuttavia, anche la microturbina è dotata di strumentazione propria che fornisce informazioni al controller della macchina. Normalmente le misure effettuate dalla strumentazione a bordo macchina, per quanto utili all'indagine sperimentale, sono solo parzialmente accessibili e, in ogni caso, non acquisibili. Per superare l'inconveniente è in corso la creazione di un'interfaccia software in grado di accedere sia alle misure monitorate dal sistema di acquisizione di cui è dotato AGATUR, sia alle misure effettuate dalla strumentazione della microturbina. L'interfaccia, realizzata in ambiente LabView®, nonostante incompleta e con obiettivi più ambiziosi, è già operativa ed ha consentito il monitoraggio completo dei parametri di funzionamento della microturbina (Figura 304).

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/220.

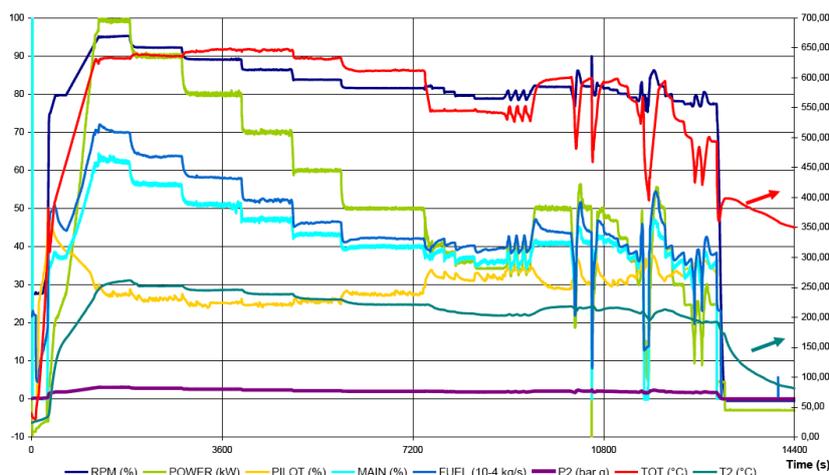


Figura 304. Alcune delle variabili della microturbina monitorate mediante dall'interfaccia in ambiente LabView

d.3 Realizzazione di un modello dinamico della micro-TG

ENEA è da tempo impegnato nella modellazione e simulazione statica e dinamica di cicli termodinamici, mediante l'uso di software industriali ampiamente utilizzati in ambito internazionale. Nello specifico, l'esperienza acquisita nell'utilizzo della suite ChemCAD®, è stata impiegata per la realizzazione di un modello dinamico della micro-turbina Turbec T100, con l'obiettivo di valutare preliminarmente il comportamento della macchina in condizioni di funzionamento non convenzionali.

La Turbec T100 può essere considerata una macchina "strategica" per il Laboratorio, essendo installata, con modifiche ed obiettivi diversi, sugli impianti AGATUR e ZECOMIX. Da qui la necessità di dotarsi di uno strumento di calcolo affidabile e flessibile, con le caratteristiche di generalità necessarie a supportare attività sperimentali finalizzate ad obiettivi molto diversi tra di loro.

L'affidabilità e la flessibilità dello strumento si giustificano con la scelta della suite ChemCAD®, da anni presente sul mercato con aggiornamenti a cadenza annuale. La generalità dello strumento nasce dalla scelta di integrare nell'ambiente ChemCAD® routine in Visual Basic che consentono di unire alle potenzialità di calcolo e all'interfaccia grafica offerte dalla Suite, la modellazione ed il matching delle turbomacchine effettuati secondo i dettami dell'analisi dimensionale.

In generale, la risposta di un turbogas in determinate condizioni di funzionamento è la risultante di due sistemi dinamici che interagiscono influenzandosi a vicenda: il sistema fisico vero e proprio, composto dalle macchine e dai fluidi che con esse interagiscono, ed il sistema di controllo, che ne orienta la risposta a determinate condizioni al contorno. L'approccio seguito nella modellazione della microturbina è coerente con quanto sopra: è stato istruito un modello "fisico" della T100, in cui la componente strettamente chimica del calcolo viene gestita da ChemCAD, mentre il comportamento termodinamico delle turbomacchine, il "flow matching" ed il "work matching" vengono calcolati da un modello scritto in VBA (Visual Basic for Applications) ed integrato nella Suite commerciale. Le curve caratteristiche delle turbomacchine sono state espresse come correlazioni di gruppi full-dimensionless, per considerare l'impatto della variazione della composizione del fluido di lavoro sulla performance della macchina. Al modello fisico si affianca il modello del sistema di controllo, realizzato nello stesso ambiente ChemCAD.

L'attività relativa all'istruzione del modello ha comportato la scrittura di circa 8000 righe in VBA e può considerarsi ad oggi conclusa (Figura 305). Nella prossima annualità verranno sfruttati i dati sperimentali ottenuti dall'esercizio della microturbina per validare e tarare il modello costruito. Una volta messo a punto, lo strumento verrà utilizzato per un'estesa campagna di simulazioni a carattere previsionale, finalizzate a stimare il comportamento della microturbina durante il funzionamento transitorio con fluido di lavoro di composizione variabile, fino alla condizione limite del loop "capture ready" di cui si è già detto.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/221.



Figura 305. Finestra dinamica del modello realizzato in ChemCAD. I grafici illustrano l'evolversi al variare del tempo di alcune delle variabili della microturbina

d.4 Impostazione delle simulazioni di ossi-combustione $CO_2/O_2/CH_4$ nel bruciatore di T100.

Sono state impostate e avviate simulazioni CFD di ossi-combustione di CH_4 in atmosfera di CO_2/O_2 nella camera di combustione della microturbina T100.

L'assenza di azoto consente l'eliminazione della produzione di NO_x e le temperature sono controllate diluendo l'ossigeno proprio in CO_2 . Le emissioni di CO all'equilibrio in sistemi diluiti in CO_2 risultano molto più alte rispetto ai sistemi tradizionali e in più le specifiche tecniche sul pipeline negli impianti di sequestrazione, impongono di controllare i livelli di CO e O_2 , per ragioni di corrosione. Un aspetto chiave per la fattibilità economica e tecnica di un impianto oxy-fuel riguarda sia la produzione di ossigeno che il progetto aerodinamico della turbina che andrebbe modificato a causa delle diverse proprietà del fluido di lavoro.

L'utilizzo della CO_2 come diluente nella combustione di gas naturale influisce sulla fiamma in diversi modi:

- variazione del calore specifico e della temperatura adiabatica di fiamma;
- variazione delle proprietà di trasporto (conducibilità, viscosità, diffusività);
- variazione dei tassi cinetici di reazione;
- variazione del trasferimento radiativo di calore.

In particolare rispetto all'ultimo punto, l'assorbimento radiativo dovuto alla presenza di maggiori quantità di CO_2 comporta un incremento della velocità laminare di fiamma ed un'estensione dei limiti di infiammabilità.

Dal punto di vista del calcolo CFD c'è bisogno di meccanismi cinetici di reazione semplificati, che consentano di contenere l'onere computazionale. In un'analisi preliminare sono quindi stati testati diversi meccanismi cinetici disponibili in letteratura, individuando quello più adatto.

L'obiettivo del presente studio è di valutare il funzionamento del combustore della microturbina TURBEC T100 progettato per operare in atmosfera di aria e gas naturale. La condizione operativa di riferimento in termini di portate è la stessa della combustione in aria, sostituendo all'azoto l'anidride carbonica. Sono state effettuate diverse simulazioni facendo variare la portata complessiva di CO_2/O_2 ed il tenore di O_2 per complessivi sei casi. La prima simulazione effettuata è stata eseguita nelle stesse condizioni di portata del caso di riferimento, semplicemente sostituendo all'azoto l'anidride carbonica. Il risultato è stato lo spegnimento della fiamma. Si è proceduto quindi riducendo la portata di CO_2 per diverse concentrazioni di O_2 . Riducendo la portata comburente di un fattore 1,2, la concentrazione minima di O_2 in essa necessaria al sostentamento della fiamma risultava essere intorno al 25%. Per altro in questo caso le temperature medie in camera di combustione sono risultate alquanto basse, con molti incombusti allo scarico. Anche per una riduzione di portata comburente di un fattore 1,5 non si è riusciti ad andare al di sotto del 25%, ma comunque con temperature più nella norma rispetto al caso precedente. Per questi motivi si è scelto di effettuare delle prove in cui nella portata diluente è assente l'ossigeno, questo viene introdotto solo immediatamente prima di entrare in camera di combustione, in modo da ridurne lo spreco (Figure 306 e 307). Infatti la soluzione in cui si utilizzano due portate differenti, una con ossigeno e l'altra senza, per premiscelato + fiamma pilota e diluizione rispettivamente, potrebbe essere quella più semplice e praticabile nell'ottica di una riprogettazione del sistema senza sconvolgerlo del tutto.

Considerando le emissioni di CO, la percentuale di ossigeno nei gas combusti e le temperature medie e massime, le condizioni operative in questo caso risultano essere quelle più idonee.

L'attività ovviamente prosegue nel prossimo PAR essendo, quelli descritti, primi test preliminari. I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/222.

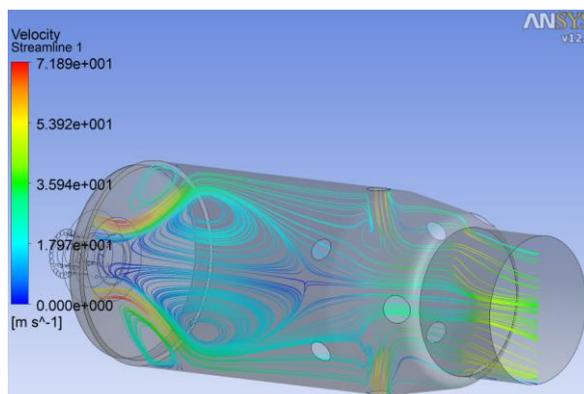


Figura 306. Linee di flusso

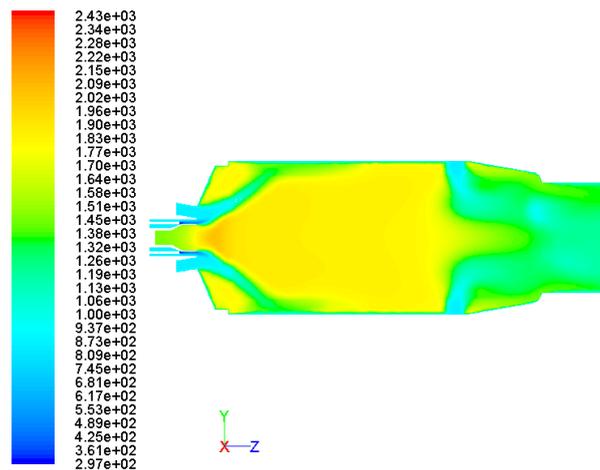


Figura 307. Temperatura (K)

e. Tecnologie per la rimozione permanente della CO₂

L'obiettivo attiene al tema centrale del sequestro definitivo della CO₂, di tipo geologico, chimico o connesso al suo utilizzo.

e.1 Stoccaggio della CO₂: realizzazione e sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO₂. Elaborazione di linee guida per la progettazione e realizzazione di una rete di monitoraggio

Il task prevede l'approfondimento degli aspetti di stoccaggio geologico di CO₂ con particolare riferimento agli aspetti di monitoraggio geochimico dell'area da adibire a deposito geologico.

Ampliamento e sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimica nell'area del bacino minerario del Sulcis

La rete ha per obiettivo la misura diretta al suolo e all'interno di pozzi, delle concentrazioni e del flusso di CO₂, CH₄ e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, Eh, concentrazioni in falda, etc.). La finalità è quella di definire le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO₂ prodotta da processi biologici (background o baseline) quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO₂ profonda. Parallelamente a metodi di indagine più tradizionali, sono stati messi a punto metodi di analisi isotopica del carbonio e/o del radiocarbonio, tipicamente di tipo off-line, per la caratterizzazione delle condizioni baseline e post iniezione.

L'attività è stata condotta da ENEA in collaborazione con l'Università "Sapienza" di Roma - CERI, che ha reso disponibile e ampliato la sua rete di monitoraggio, consistente di sei stazioni di monitoraggio, la cui dislocazione, all'interno della concessione mineraria "Monte Sinni" della Carbosulcis S.p.A. in studio, è illustrata in Figura 308.

Per quanto in particolare attiene all'attività condotta dall'Università, il periodo in esame è stato caratterizzato dal furto della stazione SARDEGNA2. Data la posizione particolarmente esposta di questo sito, la stazione, con modem gprs e sonde collegate via cavo, è stata sostituita con tre sonde di nuova generazione con batterie al litio, datalogger interno e connessione USB. Le sonde sono state posizionate nei pozzi preesistenti, nei quali è stata verificata la presenza di acqua ad una profondità inferiore a 5 m dal piano campagna. Le sonde vengono periodicamente recuperate per il download dei dati ed il loro inserimento manuale nel database centrale.

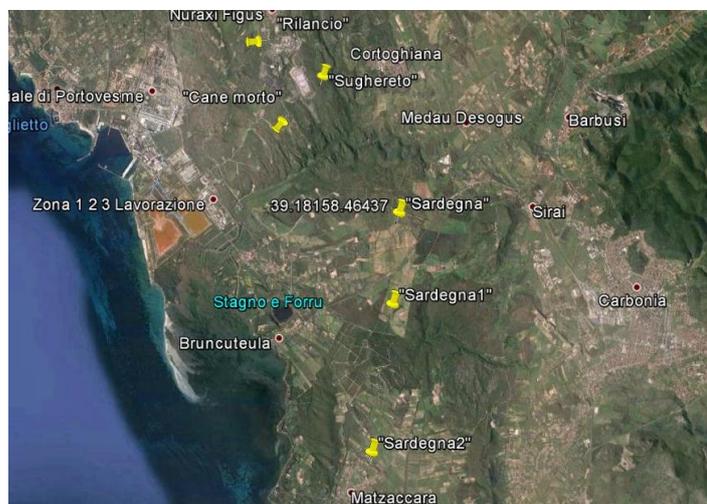


Figura 308. Dislocazione delle sei stazioni di monitoraggio all'interno della concessione mineraria "Monte Sinni" della Carbosulcis S.p.A.

Dopo gli interventi di manutenzione e sostituzione delle sonde danneggiate effettuati a maggio 2012, nello scorso periodo di attività, nelle stazioni SARDEGNA e SARDEGNA1 non si è resa necessaria alcuna manutenzione straordinaria. Vengono di seguito illustrati i risultati ottenuti dalle singole stazioni.

Stazione "SARDEGNA"

Dal monitoraggio della stazione SARDEGNA (Figura 309) è emerso che:

- le concentrazioni misurate sono mediamente più alte (1,6%) nel periodo più caldo, in cui l'attività biologica è maggiore, e più basse nel periodo più freddo, in cui l'attività biologica è minore;
- la variabilità dei valori misurati intorno alla media è molto marcata.

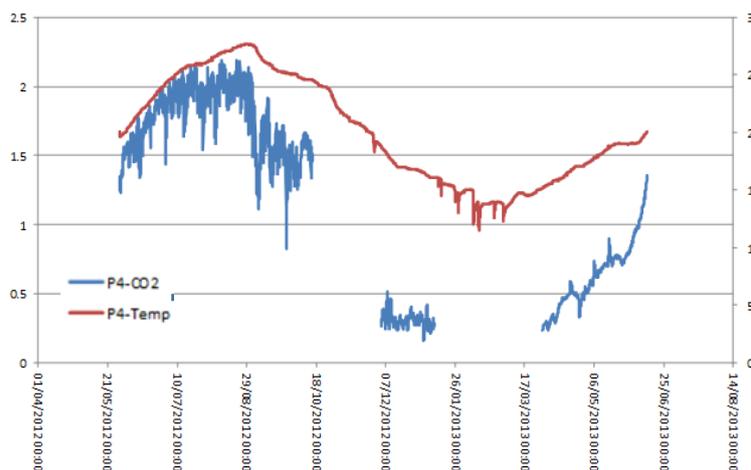


Figura 309. Stazione SARDEGNA - T (°C) e CO₂ (%) della sonda P4

Dalla valutazione delle misure effettuate da sonde a diverse profondità nello stesso punto (Figura 310) emerge che:

- i valori sono mediamente più alti nelle sonde più profonde;
- l'andamento delle concentrazioni è molto simile e l'ampiezza delle variazioni è maggiore nelle sonde più profonde;
- le variazioni di temperatura misurate a profondità maggiori hanno ampiezza minore.

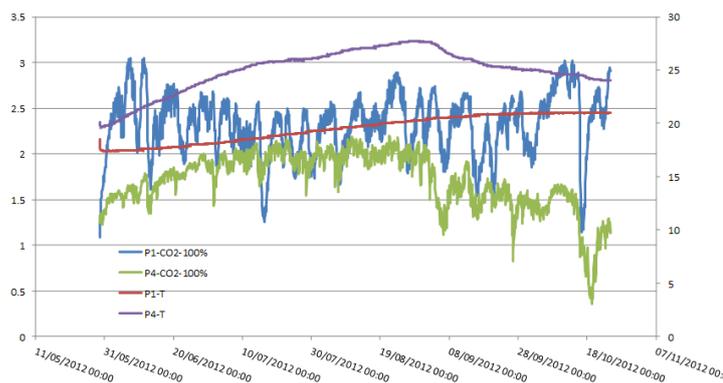


Figura 310. Stazione SARDEGNA - T (°C) e CO₂ (%) delle sonde P1 e P4

Stazione "SARDEGNA1"

La sonda posizionata nel pozzo 2 a 2,5 metri di profondità (in assenza di acqua) è stata esposta ad una concentrazione di CO₂ molto superiore al suo fondo scala (10%) ed ha quindi fornito valori inizialmente molto sovrastimati (fino 45%) ed in seguito non determinabili. Negli altri due pozzi è presente acqua, quindi le misure devono essere lette come pressioni parziali.

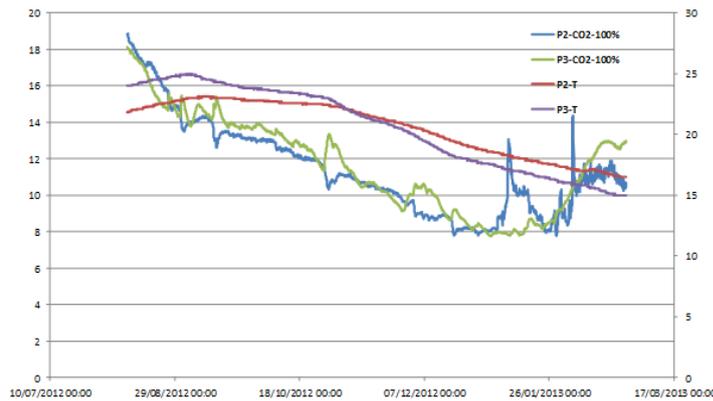


Figura 311. Stazione SARDEGNA1 - T (°C) e CO₂ (%) delle sonde P2 e P3

Stazione "SARDEGNA2"

La stazione SARDEGNA2 è stata oggetto di furto dopo soli 15 giorni dalla sua installazione; si è pertanto deciso di riposizionare sonde con batterie e datalogger senza centralina di trasmissione. I dati verranno periodicamente scaricati dalle sonde ed inseriti nel database.

In tutti i pozzi della stazione SARDEGNA2 è presente acqua. Anche in questo caso le concentrazioni misurate sono molto più costanti di quelle raccolte nella zona insatura permettendo una più facile definizione della baseline (Figura 312).

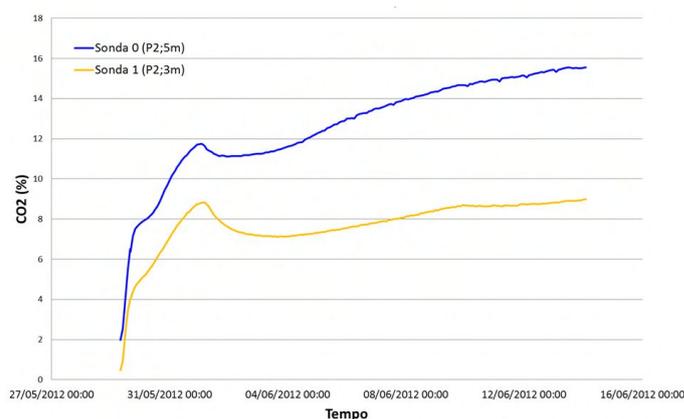


Figura 312. Stazione SARDEGNA2 - CO₂ (%) delle sonde P0 e P1

Tre nuove stazioni

Per meglio comprendere la distribuzione delle concentrazioni nel suolo e vista la possibilità di poter utilizzare sonde con batterie e datalogger caratterizzate da basso costo, basso impatto ambientale, nessuna necessità di manutenzione, si è deciso di ampliare l'area di indagine con monitoraggio continuo. In accordo con ENEA e Carbosulcis, la scelta è ricaduta su una zona posta a nord-ovest rispetto al posizionamento delle stazioni precedenti nell'intorno della discarica per lo stoccaggio di ceneri della centrale Enel. La decisione è stata guidata dalla necessità di indagare meglio le variazioni di concentrazioni a valle e a monte della discarica. La presenza di pozzi utilizzabili messi a disposizione dalla Carbosulcis, ha reso il posizionamento delle sonde più semplice ed economicamente vantaggioso.

Il 25 settembre 2013 sono state completate le operazioni di installazione di tre nuove sonde nei punti denominati "Rilancio" (39°12'57" N, 8°25'59" E), "Cane morto" (39°12'7" N, 8°26'17" E) e "Sughereto" (39°12'26" N, 8°26'45" E). Le tre sonde sono state posizionate rispettivamente ad una profondità di 3, 7 e 30 m. Al momento del posizionamento nessuna delle 3 sonde risultava sommersa.

In conclusione, le stazioni installate stanno permettendo la costituzione di un robusto database finalizzato a comprendere i valori tipici di CO₂ che caratterizzano il sito di studio (baseline) per poter discriminare variazioni indicatrici di microfughe dal serbatoio da semplici variazioni naturali.

Già oggi è possibile confermare l'elevata variabilità nel tempo delle concentrazioni misurate. Il monitoraggio in continuo è quindi uno strumento irrinunciabile per la comprensione delle oscillazioni naturali della CO₂. Si osserva

che le concentrazioni misurate in acqua sono molto più costanti di quelle raccolte nella zona insatura del terreno permettendo una più facile definizione della baseline. L'attività è descritta in dettaglio nel rapporto RdS/2013/224.

ENEA, dal canto suo, ha integrato la rete di postazioni fisse dell'Università di Roma, già presente, con una unità mobile di misura delle concentrazioni e dei flussi di CO₂ da suolo, in grado di monitorare nel tempo, in intervalli temporali ritenuti stabili dal punto di vista della emissività stagionale, diverse zone di interesse.

Quanto descritto si riferisce ad una prima fase di test e misura delle concentrazioni e dei flussi di CO₂ da suolo effettuate nel corso del 2013 (Figura 313).



Figura 313. Attività di monitoraggio della concentrazione e del flusso di CO₂ dal suolo

Lo svolgersi delle attività ha innanzi tutto visto la verifica di quanto presente sul mercato e l'acquisizione di un sistema "stato dell'arte" per il monitoraggio delle emissioni di CO₂ presente nel gas di suolo. La scelta è ricaduta su un sistema "a camera" che consente sia la misura della concentrazione di CO₂ che la misura del flusso specifico da suolo con il metodo della "camera di accumulo" (Figura 314).

E' stata poi effettuata la misura delle concentrazioni di gas al suolo in siti baseline, in siti di potenziale interesse ed in corrispondenza ai punti ove il monitoraggio viene già condotto in collaborazione con il partner scientifico CERI. Infine si è fatta una prima valutazione della misura del flusso specifico di CO₂ dal suolo con il metodo della camera di accumulo.



Figura 314. Dispositivo di misura del flusso di CO₂ a "camera di accumulo"

Questo metodo tiene conto della variazione della concentrazione di gas che nel tempo si accumula all'interno di una camera posta sopra la superficie del terreno. Il tasso di variazione della concentrazione rifletterà il tasso di emissione del gas. Ci sono due tipi di camere quelle così dette statiche e quella dinamiche. Nelle prime si effettua il campionamento a intervalli temporali prestabiliti dopo aver ricoperto la superficie del terreno con la camera. Nelle camere dinamiche invece si fa circolare in continuo l'aria tra la camera ed uno strumento che monitora la concentrazione di CO₂.

La Figura 315 riporta un esempio applicativo di misura di flusso di CO₂ da suolo. Il grafico è ottenuto misurando la concentrazione di CO₂ con il metodo della camera. Il grafico mostra le micromoli di CO₂ per mole di aria (o ppmv) in funzione del tempo, espresso in secondi. La camera viene connessa al tempo zero, l'aumento della concentrazione ha una pendenza di circa 0,3 ppmv /s.

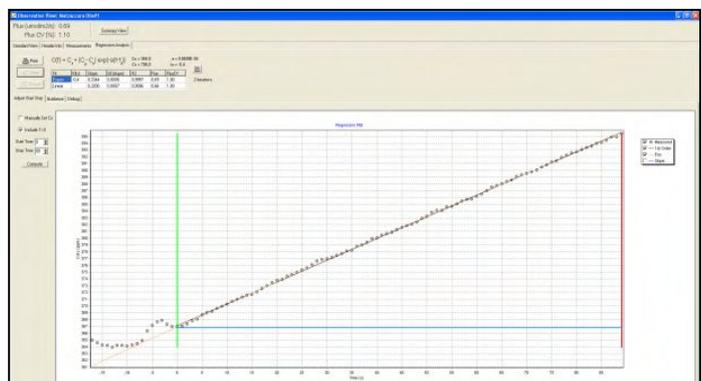


Figura 315. Misura del flusso di CO₂ dal suolo: andamento delle concentrazioni di CO₂ in camera di accumulo

L'attività è descritta nel rapporto RdS/2013/223.

Sempre con riferimento all'aspetto monitoraggio, ENEA ha iniziato l'implementazione di tecniche di monitoraggio isotopico della CO₂ dai depositi geologici di stoccaggio, in un'ottica di integrazione con i sistemi e la rete sopra descritta.

Lo scopo dell'utilizzo delle tecniche isotopiche è quello di tracciare la CO₂ iniettata nei pozzi in maniera da discriminare le eventuali perdite dalla CO₂ normalmente presente in atmosfera e nei suoli.

Il tracciante che è stato scelto è quello del radiocarbonio poiché il combustibile fossile bruciato negli impianti termoelettrici è completamente privo di questo isotopo. In atmosfera invece il ^{14}C è presente perché viene prodotto continuamente per interazione dei raggi cosmici con gli strati superiori dell'atmosfera, in più è ancora presente una quota di radiocarbonio prodotta dai test nucleari degli anni '60. Nelle misure di radiocarbonio si prende come riferimento la concentrazione presente in aria nel 1950 che corrisponde ad un'attività di $0,226 \pm 0,001 \text{ Bq/gC}$. Questa attività viene assunta come "standard moderno" e le misure ambientali di radiocarbonio vengono normalmente presentate in percentuale di questa quantità.

La discriminazione tra CO_2 atmosferica e quella fossile è molto agevole poiché la precisione del metodo è intorno al 5%, quindi abbiamo un possibile range di misure su quasi tre ordini di grandezza, cosa che consente di valutare percentuali anche piccole di contaminazione da parte di fuoriuscite dai depositi.

Nonostante le potenzialità del metodo finora la complessità delle misure ha fatto sì che questo non sia stato utilizzato negli impianti sperimentali attuali. Solo recentemente¹³ nel sito di Weyburn è iniziata la sperimentazione su questo isotopo grazie ad una collaborazione con il laboratorio di Livermore.

Il laboratorio tracciabilità dell'ENEA di Bologna fa analisi di radiocarbonio da più di 20 anni ed è quindi in grado di affrontare agevolmente la problematica. Il problema da risolvere è quello del campionamento e dei protocolli relativi. Per questo si è acquisito un campionatore fornito dalla francese SDEC (mod Hague 7000) che è stato sviluppato proprio per effettuare misure di radiocarbonio in atmosfera. Questo funziona con il principio della fissazione della CO_2 in soluzione di NaOH, con controllo del flusso e delle temperatura del campionamento. Si possono effettuare campionamenti molto lunghi (tipicamente 3000 min) in maniera da raccogliere nella soluzione 2-3 g di carbonio sotto forma di carbonato disciolto, che è la quantità necessaria per effettuare le misure nell'impianto di Bologna.

Sono in corso le prove preliminari di cattura e di successivo rilascio della CO_2 mediante attacco acido. Una volta terminate queste calibrazioni è previsto un test in campo zona dell'Emilia dove sono presenti naturalmente emissioni di CO_2 dal suolo (analogo naturale). Dopo questa fase sarà possibile effettuare le misure di stato zero nella zone del Sulcis.

L'attività è descritta nel rapporto RdS/2013/269.

Linee guida per il monitoraggio geochimico

Nell'ambito delle attività di selezione, predisposizione e sfruttamento di un sito di stoccaggio geologico della anidride carbonica, assume un'importanza fondamentale la capacità di monitorare efficacemente l'area interessata.

La serie di studi che bisogna mettere in campo deve essere in grado di fornire sia informazioni descrittive dell'area di stoccaggio, sia permettere rapide ed efficaci identificazioni di anomalie che possano essere potenzialmente collegate a fughe e/o microfughe dalla trappola geologica. In tal modo si potrà disporre di strumenti indispensabili a certificare la presenza o meno di problemi legati allo stoccaggio geologico e, in caso di emergenza, mettere in campo contromisure adeguate.

L'insieme degli studi e delle misure da predisporre in un contesto di monitoraggio dei siti di stoccaggio dovrà fornire sia un'adeguata mappatura geologico-strutturale, sia valori di riferimento di variabili specifiche. In tal modo sarà possibile ottenere un dataset completo da utilizzare per confronti puntuali con le misure effettuate successivamente. Tale dataset sarà inoltre di grande supporto per il successo delle attività mirate alla "public acceptance" del processo di stoccaggio geologico.

Sulla base di quanto premesso e degli studi effettuati in diversi contesti geologici e, in particolare, di tutte le attività messe in campo nell'area della concessione mineraria "Monte Sinni" nell'area del Sulcis, l'Università di Roma "Sapienza", nell'ambito della collaborazione con ENEA, ha ritenuto opportuno proporre le seguenti attività di studio/monitoraggio da mettere in campo per una adeguato controllo dei siti di stoccaggio secondo un "modello di monitoraggio" geochimico ben programmato:

1. Rilevamento geologico strutturale dell'area. Tale studio mette in evidenza la presenza di faglie e/o fratture sia al fine di verificare l'idoneità del potenziale sito di stoccaggio, sia di fornire supporto alla migliore ubicazione delle altre tipologie studi proposte nel modello di monitoraggio.
2. Identificazione delle famiglie geologico-strutturali e litologiche presenti nell'area al fine di individuare eventuali situazioni di criticità legate alla presenza di potenziali zone di maggiore permeabilità gas (sia primaria che secondaria).

¹³ N. Nickerson, D. Risk, International Journal of Greenhouse Gas Control, 14 (2013) 239–246

3. Prospezione dei gas del suolo finalizzata alla determinazione della “baseline”. Tali misure, oltre a permettere di comprendere lo stato del sistema naturale in condizioni indisturbate (e quindi a comprenderne le variazioni rispetto ai valori “normali”) permetteranno di ottenere informazioni preziosissime da utilizzare in tutte le attività di coinvolgimento della popolazione locale. Tali studi interessano tutte le fasi del processo di stoccaggio (prima, durante e dopo l’iniezione di CO₂).
4. Verifica della eventuale permeabilità delle strutture geologiche messe in luce dalla prospezione geologico-strutturale attraverso lo studio della correlazione tra i sistemi di faglie cartografati e le aree di anomalie messe eventualmente in luce dalla prospezione dei gas del suolo.
5. Installazione di stazioni monitoraggio geochemico (misura di CO₂ libera e/o disciolta) in continuo in zone del sito di stoccaggio opportunamente selezionate sulla base di quanto descritto negli altri punti. L’obiettivo di tali sistemi è quello di verificare la presenza di variazioni a lungo termine e/o di trend nella concentrazione dei gas misurati. La tipologia di variazione misurata (a lungo o breve termine) è molto importante per comprendere se l’origine della variazione è biologica o di altra natura. Nel primo caso, infatti, essendoci un potenziale legame con modifiche delle condizioni ambientali, le variazioni saranno a breve termine (ciclicità giornaliera e/o stagionale).

L’attività è descritta nel rapporto RdS/2013/270.

e.2 Utilizzo e fissaggio chimico della CO₂

Il task intende dimostrare la fattibilità tecnica, e valutare la sostenibilità economica, di tecnologie per la produzione di gas naturale sintetico (SNG) o di “chemicals”, attraverso processi di ricombinazione di CO₂ con Idrogeno.

Tecnologia di metanazione per la produzione di SNG

La prima parte dell’obiettivo, condotto da ENEA, è legata all’applicazione della tecnologia di metanazione per la produzione di SNG, realizzando un sistema di generazione di metano, ad elevato grado di purezza, integrato con la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili e contemporanea rimozione di anidride carbonica da impianti a combustione, l’impianto è denominato “FENICE”.

Il sistema di generazione proposto consente di ottenere un gas sostitutivo del gas naturale, che integrando la produzione elettrolitica di idrogeno (da fonti rinnovabili) e la cattura di anidride carbonica proveniente da impianti di generazione termica o elettrica, consente la produzione, in reattori di tipo catalitico, di metano ad elevato grado di purezza. Per la conservazione a lungo termine e il bilanciamento stagionale delle fonti di energia rinnovabili, i sistemi di accumulo chimico che operano la conversione dell’energia elettrica in vettori energetici quali l’idrogeno o il metano, possono candidarsi a essere i più idonei.

Il sistema nel suo insieme risulta costituito da più sezioni integrate e connesse tra di loro: una sezione di captazione della anidride carbonica proveniente da fonte fossile, una sezione di trattamento del gas, una sezione di generazione dell’idrogeno che si avvale di un elettrolizzatore, una sezione di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, una sezione di idrogenazione catalitica dell’anidride carbonica in metano, una sezione di controllo del processo funzionante anche in remoto, una sezione di interconnessione alla rete gas (presente solo nel caso in cui il gas prodotto viene immesso in rete). Il processo è schematicamente riassunto in Figura 316.

Cuore del dispositivo è il reattore di metanazione all’interno del quale avviene la reazione di conversione della CO₂ in metano, reazione che risulta principalmente influenzata dalla temperatura della reazione, dalla pressione e dalla composizione del gas di alimentazione.

Le caratteristiche innovative del sistema si possono così riassumere:

- produzione di un vettore energetico sostenibile, di caratteristiche assimilabili a quelle del gas naturale standard, già presente sul mercato e quindi adatto ad essere utilizzato in tutta una serie di pre-esistenti utilizzatori finali che spaziano dal settore termico, all’elettrico al veicolistico (con diversificazione nell’utilizzo finale dell’energia rinnovabile);

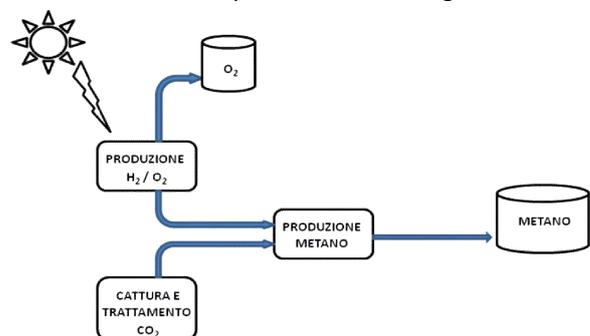


Figura 316. Schematizzazione del processo produzione di SNG, attraverso processi di ricombinazione di CO₂ con Idrogeno da fonti rinnovabili

- possibilità di fungere da accumulo energetico per i sistemi di produzione elettrica da fonti rinnovabili tipicamente non programmabili in dettaglio e comunque caratterizzate da forti fluttuazioni temporali;
- La cattura di anidride carbonica generata da impianti energetici convenzionali e la contestuale produzione di combustibile metano rende il sistema nel suo complesso a bilancio nullo di CO₂.

La conversione della CO₂ in metano, utilizzando idrogeno prodotto dall'elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili, consentirebbe la produzione di SNG ad emissioni zero. Il vantaggio di questa tecnologia è la generazione di un prodotto standardizzato quale il metano che può essere utilizzato direttamente, immesso in rete o stoccato per un utilizzo successivo locale. Un ulteriore prodotto del sistema proposto è l'ossigeno di purezza elettrolitica che potrebbe trovare impieghi vari, non ultimo, su scala appropriata, quello di alimentare un sistema a ossi-combustione di carbone, che di rimando fornirebbe la CO₂ da sequestrare (Figura 317).

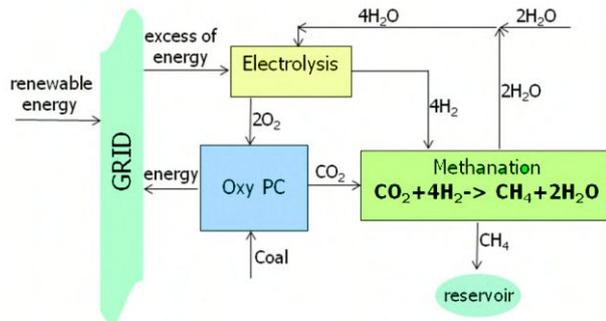


Figura 317. integrazione del sistema con la rete e con impianto a oxy-combustione

Il sistema proposto come loop dimostratore della tecnologia (Impianto FENICE), si avvale dell'utilizzo di componentistica ampiamente diffusa sul mercato e di un sistema di controllo per la gestione anche da remoto. Tutte le tecnologie coinvolte nel sistema, da quelle per la separazione della CO₂, a quelle per il trattamento del syngas, della conversione in metano e della produzione di idrogeno o sono ampiamente commerciali o sono tecnologicamente "dominate" da ENEA e dimostrabili con dispositivi già disponibili.

Il loop, realizzato si compone di:

- un elettrolizzatore ad acqua, basato su tecnologia a elettrolita solido (membrana polimerica). Il flusso massimo è di 750 NL/h, con un grado di purezza dell'idrogeno prodotto del 99,5%, ad una pressione massima di 15 bar, e alimentazione duale (manuale da rete e pannelli fotovoltaici);
- un reattore di metanazione, costituito da:
 - un miscelatore di gas in AISI316L a tre ingressi ed una uscita;
 - una pompa per la ricircolazione del gas tipo KNF, che assicuri una portata pari ad almeno 20 NI/min a pressione atmosferica, e idonea ad operare ad una pressione assoluta di 5 bar;
 - due scambiatori in acciaio inox AISI 316L, uno gas/gas, l'altro gas/liquido;
 - il reattore chimico di metanazione in acciaio inox AISI 316L;
 - un compressore di metano, tipo THOMAS, che assicuri una portata pari ad almeno 5 NI/min a una pressione di 7 bar;
 - un serbatoio di stoccaggio metano in acciaio inox AISI 316 L, della capacità di 10 kg e resistente alla pressione di 20 bar.

Il tutto montato su Skid metallico in AISI 316 L per il posizionamento dei vari componenti.

In vista dell'impiego sul dimostratore "FENICE", sono stati acquisiti e caratterizzati alcuni catalizzatori commerciali e confrontati con quelli "home made" (HM) sintetizzati in ENEA. I catalizzatori usati sono stati il BASF G1-85 e il BASF RP-75.

Sia i catalizzatori BASF che quello HM sono a base di nichel supportato su allumina. La quantità di Ni dichiarata per il G1-85 è del 50%, mentre per l'RP-75 è del 10-12%. Per il catalizzatore HM contiene 44,3% w/w di Ni.

Tutti gli esperimenti sono stati condotti usando CO₂ e H₂ in rapporto stechiometrico, cioè 1/4. Prima di ogni nuovo run sperimentale, il catalizzatore viene trattato con idrogeno a 673 K per 4 h, quindi la temperatura viene portata al valore desiderato e viene aggiunto il flusso di biossido di carbonio.

Nella Figura 318 è riportata la resa molare di conversione in metano (cioè le moli di metano prodotte per mole di anidride carbonica immessa) in funzione della temperature nell'intervallo 300-900 K. La miscela di reazione è composta da 160 sccm of H₂ and 40 sccm of CO₂ e la pressione viene fissata ad una atmosfera. I catalizzatori sono 0,392 g di G1-85; 0,390 g di RP-75 e 0,401 g HM-2.

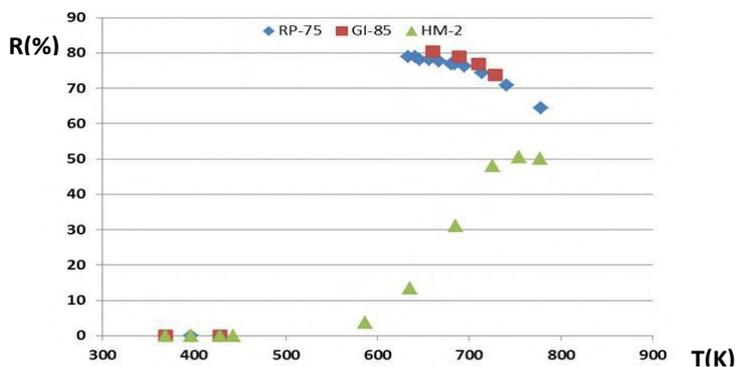


Figura 318. Resa di conversione in metano in funzione della temperature per catalizzatori commerciali ed home-made

Come si vede dalla Figura 318, I catalizzatori commerciali hanno un'attività superiore rispetto a quello home-made. La temperatura di innesco della reazione è di circa 450 K per i catalizzatori BASF, mentre per l'HM questo valore è di circa 600 K. La massima resa di conversione per i BASF è dell'80%, mentre per HM è di circa 50%. Nonostante la maggiore attività catalitica, i catalizzatori G1-85 ed RP-75 esibiscono un'area superficiale minore rispetto a quello HM. I valori di area superficiale BET, calcolati dall'assorbimento di N₂ a 77 K sono:

- G1-85 = 123 m²/g
- RP-75 = 130 m²/g
- HM-2 = 313 m²/g.

Questo dato dimostra un maggiore turnover number (TON) per i catalizzatori commerciali.

L'analisi SEM/EDS sui vari campioni rivela la presenza di zirconio nei catalizzatori BASF. Questa potrebbe essere la ragione delle migliori prestazioni dei catalizzatori BASF rispetto a quello HM, è infatti riportato in letteratura di un effetto positivo dei metalli come Zr sui catalizzatori per metanazione. Anche la deattivazione del catalizzatore per effetto della deposizione di particelle carboniose è inibita dalla presenza di Zr, infatti si nota solo un leggero decremento dell'attività catalitica dopo 21 h di lavoro sia per il G1-85 che per l'RP-75, mentre il catalizzatore HM mostra un più marcato decremento dell'attività catalitica negli stessi tempo di lavoro. Nella figura 319 sono riportate le immagini SEM del campione G1-85 fresco (foto a sinistra) e dopo 21 h di lavoro (foto a destra). Come si nota dopo 21 h di lavoro sono presenti diverse particelle di C depositato sulla superficie, ma larga parte della stessa è libera così il catalizzatore mostra ancora una buona attività.

Sulla scorta dei risultati ottenuti, l'impianto "FENICE" sarà equipaggiato inizialmente con un catalizzatore commerciale BASF G1-85 o RP-75.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/192

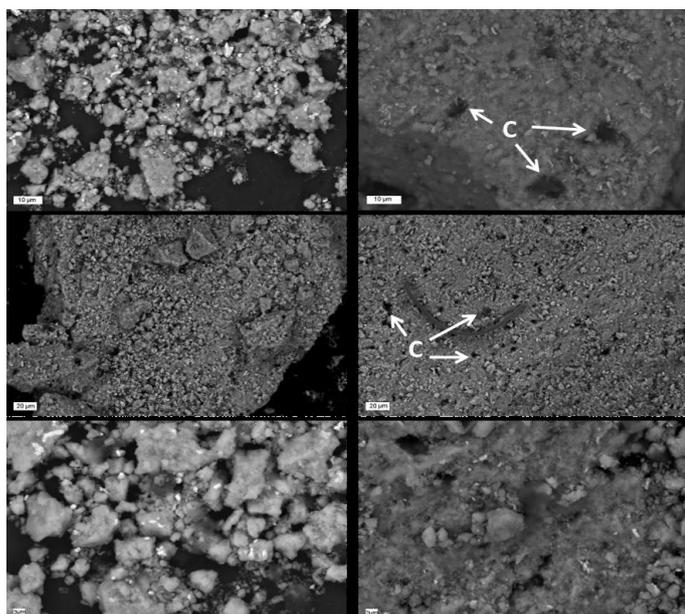


Figura 319. Immagini SEM relative al catalizzatore G1-85: catalizzatore fresco (sinistra) e dopo 21 h di lavoro (destra)

Sviluppo e messa a punto di metodi chimici per il fissaggio della CO₂

L'attività è stata condotta nell'ambito di un accordo di collaborazione con l'Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Civile, e ha riguardato in primo luogo la valorizzazione delle ceneri prodotte dall'unità di gassificazione a letto fluido dell'impianto dimostrativo Zecomix, con riferimento sia alle ceneri volanti raccolte nel ciclone di separazione e alle ceneri di fondo. In particolare, sono state condotte attività sperimentali finalizzate a separare la componente inorganica da quella organica e ad una loro caratterizzazione chimico-fisica in vista della relativa valorizzazione. In parallelo, è stata condotta un'attività modellistica finalizzata alla valutazione della fattibilità di integrare il processo Zecomix con una unità di stoccaggio di CO₂, basata sul processo di carbonatazione di minerali o residui alcalini.

I campioni di cenere analizzati in questo studio prodotti dall'unità di gassificazione a letto fluido dell'impianto dimostrativo Zecomix alimentato con carbone e olivina, sono stati: le ceneri di fondo, residuo solido del gassificatore, e le ceneri volanti (fly ash), residuo solido raccolto dal ciclone posto a valle del gassificatore per la rimozione del particolato solido dal syngas. La sperimentazione ha riguardato sia la caratterizzazione di entrambi i flussi delle ceneri di gassificazione, in termini di distribuzione granulometrica, composizione elementare, contenuto di carbonio organico totale (TOC), composizione mineralogica e comportamento ambientale, che lo sviluppo di un protocollo per il trattamento di tali residui, finalizzato alla loro valorizzazione.

Le ceneri di fondo sono risultate costituite principalmente da Mg, Si e Fe, che rappresentano i principali costituenti dell'olivina utilizzata nell'unità di gassificazione come materiale di sostegno del letto e agente catalizzante, e da un contenuto di TOC pari al 5%. Dal punto di vista del comportamento ambientale, i risultati dei test di cessione secondo la norma UNI EN 12457-2 hanno mostrato che le concentrazioni dei principali elementi presenti nell'eluato del campione medio analizzato rispettano i limiti previsti per il riutilizzo in procedura semplificata.

Vista l'elevata eterogeneità, le ceneri sono state separate, mediante vagliatura, ottenendo cinque classi granulometriche (A-E) per ciascuna delle quali è stato valutato il contenuto di TOC. Come riportato in Tabella 73, le classi B (0,425<d<0,5 mm) e C (0,5<d<0,6 mm) che sono risultate le più abbondanti (circa il 60% in peso sul totale), hanno mostrato il contenuto minore di TOC, pari a circa il 4% in peso sul totale, dovuto all'alto contenuto di olivina. La classe E (0,84<d<9,53 mm), che costituisce circa il 7% in peso del campione di ceneri di fondo, presenta il più alto contenuto di TOC, pari a circa l'84% in peso sul totale, indice di una buona separazione meccanica di tale frazione carboniosa dal resto del campione.

Per quanto riguarda il campione di fly ash, questo è stato suddiviso in tre classi granulometriche (grossolana, intermedia, fine) per ciascuna delle quali è stato valutato il contenuto di TOC. Anche in questo caso, mediante separazione meccanica, è stato possibile discriminare le frazioni a più alto contenuto di TOC, che sono risultate essere le frazioni fine e grossolana, con il 66% e il 32% in peso di TOC sul totale, rispettivamente. In Tabella 73 è riportata l'abbondanza in peso di ciascuna classe granulometrica rispetto al totale il contenuto di carbonio organico totale di ciascuna classe sia per le ceneri di fondo che per le fly ash.

Tabella 73. Abbondanza relativa delle classi granulometriche e contenuto di carbonio organico (TOC) per ciascuna classe delle ceneri di fondo e delle fly ash

Classi granulometriche	d (mm]	% in peso	TOC (% in peso)*
Ceneri di fondo			
A	d<0,425	11,68	2,17
B	0,425<d<0,5	30,9	0,25
C	0,5<d<0,6	30,81	0,32
D	0,6<d<0,84	20,08	1,29
E	0,84<d<9,53	6,54	54,26
Fly ash			
Fine	d<0,25	29,14	55,64
Intermedia	0,25<d<0,84	57,43	0,97
Grossolana	0,84<d<9,53	13,43	57,95

* la % di TOC è riferita alla singola classe granulometrica e non è riportata rispetto al peso totale del campione

Sulla base della prima fase di caratterizzazione è stato quindi possibile separare meccanicamente le frazioni granulometriche caratterizzate da alte percentuali di carbonio organico (classe E per le ceneri di fondo e classi fine e grossolana per le fly ash). Per le altre classi granulometriche delle ceneri di fondo e per la frazione intermedia delle fly ash, è stato applicato un processo di separazione per densità, con l'obiettivo di ottenere una frazione leggera (float), ricca di carbonio da rinviare in testa al processo di gassificazione, e una frazione pesante (sink) inorganica e prevalentemente costituita da olivina, riutilizzabile come supporto alla realizzazione di adsorbenti. La procedura di separazione è stata sviluppata in laboratorio e il campione da trattare è stato separato utilizzando

una miscela di bromoformio e toluene con diverse densità variabili tra 2000 e 2890 g/L. Entrambe le frazioni separate sono state sottoposte a una serie di lavaggi in acetone per rimuovere eventuali residui della miscela, essiccate e analizzate per valutare il contenuto di TOC. In particolare, per tutte le classi è stato riscontrato un contenuto di TOC trascurabile nella frazione sink, indice di una quasi completa rimozione della frazione carboniosa. La purezza del float, in termini di contenuto di TOC, è risultata decrescente all'aumentare della densità della miscela di bromoformio e toluene per tutte le classi, come riportato in Figura 320. Infatti, al crescere della densità, sebbene il quantitativo della frazione float recuperata dal campione di partenza risulti maggiore, il contenuto di carbonio organico recuperato diminuisce.

Questo risultato implica che per ottenere una frazione float "pura" con valori di TOC prossimi a quelli del carbone (circa 85%), è opportuno utilizzare una miscela di separazione caratterizzata da una densità di 2000 g/L.

La seconda parte delle attività, sempre a cura dell'Università di Roma "Tor Vergata", ha avuto come obiettivo la stima dei fabbisogni di energia e materiali associati ad un processo di carbonatazione integrato nella piattaforma Zecomix per stoccare in forma solida la CO₂ emessa. In particolare, sono state ipotizzate due possibili configurazioni: nella prima, il processo di carbonatazione verrebbe inserito a valle della gassificazione, con l'obiettivo di stoccare direttamente la CO₂ contenuta nel syngas; nella seconda opzione la carbonatazione verrebbe inserita a valle della fase di calcinazione in modo da stoccare la CO₂ che attualmente viene rilasciata in atmosfera. Da un'analisi preliminare, si è subito evidenziato che la prima opzione potrebbe essere implementata con un processo di carbonatazione gas-solido impiegando dei residui ricchi in ossidi di calcio (5-8 kg di ceneri da APC/kg CO₂) al posto del CaO impiegato nella configurazione attuale di Zecomix. Sebbene questa scelta progettuale comporterebbe una notevole riduzione del fabbisogno energetico del processo, la sua fattibilità è ostacolata dalla ridotta disponibilità di residui idonei. Per questo motivo è risultata maggiormente percorribile l'opzione di inserire il processo di carbonatazione a valle dell'attuale configurazione impiantistica della piattaforma Zecomix. In questo caso, i fabbisogni di energia e materia di ciascuna sono stati stimati utilizzando un modello sviluppato negli anni scorsi all'interno degli accordi di collaborazione con l'ENEA, che aveva l'obiettivo di studiare la fattibilità di un processo di carbonatazione di minerali e residui industriali per lo stoccaggio di anidride carbonica prodotta da impianti di piccola/media taglia. Tale modello, partendo da diverse prove di carbonatazione condotte in laboratorio su minerali e residui industriali, permetteva una stima di massima dei fabbisogni energetici del processo. Nel presente lavoro si è provveduto a modificare il foglio di calcolo sviluppato in precedenza in modo da migliorare la stima delle richieste energetiche associate a ciascuna unità del processo e aggiornare il database sperimentale per tener conto di nuovi materiali e nuove condizioni operative di carbonatazione testate negli ultimi anni. Nella stima delle richieste di materiale ed energia associate alla piattaforma Zecomix sono stati presi in considerazione i test condotti su quattro diverse tipologie di minerali e su nove diverse tipologie di residui industriali provenienti dall'industria siderurgica (scorie da BOF, EAF AOD) e dal trattamento termico dei rifiuti (ceneri da APC). In funzione della specifica opzione di integrazione con l'impianto Zecomix considerata, nel modello di calcolo sono state prese in considerazione le route di carbonatazione acquosa (rapporto liquido/solido superiore a 2 L/kg) e ad umido (rapporto liquido/solido inferiore a 1 L/kg), schematizzate in Figura 321 I risultati ottenuti hanno evidenziato una richiesta energetica pari a 1,7-5,5 MJ/kg CO₂ per la route acquosa e 1-2,5 MJ/kg CO₂ per la route ad umido, con delle richieste di minerali o residui rispettivamente di 2,3-7 kg/kg CO₂ e 4,7-13,3 kg/kg CO₂ in base alla specifica tipologia di matrice alcalina considerata.

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto Rds/2013/226.

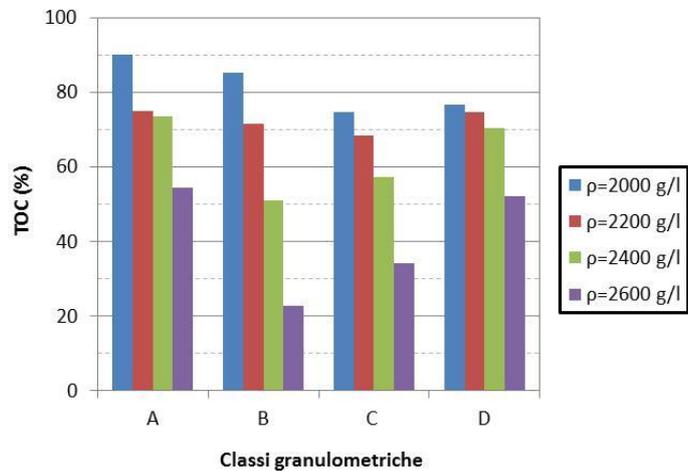


Figura 320. TOC (%) nelle classi granulometriche al variare della densità della soluzione toluene-bromoformio

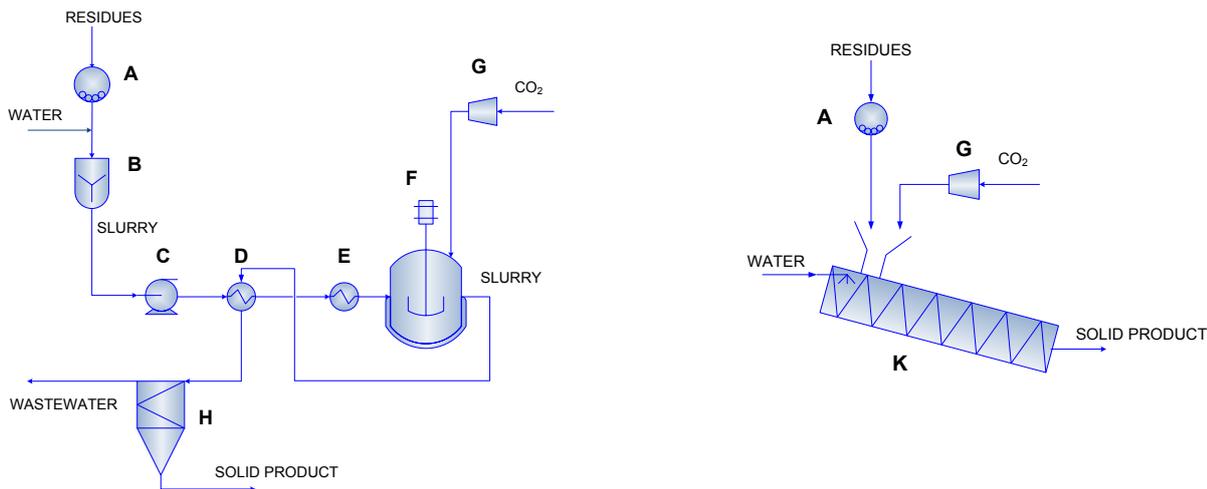


Figura 321. Layout del processo di carbonatazione con route acquosa (sinistra) ed ad umido (destra)

e.3 Supporto ad attività dimostrative e di "advisor" nazionale per le tecnologie di cattura e sequestro della CO₂

L'obiettivo prevede attività specifiche di supporto ai Ministeri competenti, attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali.

Le attività svolte da ENEA con riferimento all'obiettivo, sono inserite nel complesso contesto internazionale nel quale operano governi, istituzioni pubbliche e operatori privati, con l'obiettivo di accelerare lo sviluppo e l'ingegnerizzazione delle tecnologie per l'impiego sostenibile dei combustibili fossili e, in questo ambito, operare per rendere competitive le tecnologie di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica in grado di consentire l'impiego dei combustibili fossili, specialmente il carbone, con una drastica riduzione delle emissioni di CO₂.

Le considerazioni descritte nel rapporto RdS/2013/227 vogliono fornire un quadro, sintetico ma esaustivo, del quadro internazionale ed europeo nel quale si è operato per rafforzare il ruolo e la presenza italiana in un settore nel quale si gioca una delle sfide più difficili dei prossimi anni, quella cioè di rendere "sostenibile" il percorso ineludibile verso una società "low carbon", tenendo ben presenti due fondamentali considerazioni a monte: (i) nei prossimi decenni continuerà l'impiego massiccio di combustibili fossili; (ii) essenziale, per limitare i danni, è riuscire a sviluppare e rendere competitive le tecnologie CCS. La sfida si gioca a livello globale, e richiede una sempre maggiore e più efficace cooperazione internazionale.

A tal fine nel rapporto sono sinteticamente descritte le attività condotte nell'ambito di alcuni organismi internazionali, e i risultati più rilevanti ottenuti.

In particolare si fa riferimento a:

- *Partecipazione, quale delegato italiano, nel Technical Group del CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum).* Il CSLF è un consesso internazionale che ha la missione di facilitare lo sviluppo e l'applicazione delle tecnologie CCS attraverso collaborazioni intergovernative volte a superare i principali ostacoli di ordine tecnico, economico ed ambientale, promuovendo anche la consapevolezza del pubblico nonché sviluppi normativi e finanziari internazionali.
- *Partecipazione, quale delegato italiano, a organismi della IEA:*
 - Working Party on Fossil Fuels
 - Implementing Agreement Clean Coal Centre (CCC)
 - Implementing Agreement Gas and Oil Technologies (GOT).
- *Partecipazione al Global Carbon Capture and Storage Institute (GCCSI).* Il GCCSI è un'organizzazione nata su iniziativa del Governo australiano il cui obiettivo è mobilitare risorse pubbliche e private per diffondere le tecniche CCS. L'impegno immediato è quello di accelerare l'avvio di oltre venti progetti pilota. E' in discussione il piano strategico.
- *Partecipazione, quale Membro italiano, alla piattaforma tecnologica europea ZEP (Zero Emission Fossil Fuels Power Plants).* La piattaforma tecnologica ZEP unisce e rappresenta gli operatori industriali europei impegnati nelle tecnologie CCS; partecipano rappresentanti del mondo della ricerca e vari operatori; è diretta dal "ministerial group" ed è organizzata in task force. La partecipazione ENEA ha consentito di discutere delle priorità di politica energetica italiana e degli aspetti tecnici legati alle esigenze di ricerca e sviluppo e di diminuzione dei costi.

- *Partecipazione, quale delegato italiano, al CCS-EII Team, team della Iniziativa Industriale Europea (EII) per la cattura, trasporto e stoccaggio della CO₂ (CCS) del SET Plan (Strategic Energy technologies).* Opera, in particolare, per l'individuazione di strategie europee e sui finanziamenti europei, specialmente quelli per attività di sviluppo e dimostrative. Particolare attenzione è stata posta alla definizione dei nuovi indirizzi di politica europea della ricerca (Horizon 2020).
- *Partecipazione a EERA (European Energy research Alliance) per le tecnologie CCS.* E' un organismo analogo alla piattaforma ZEP ma riunisce gli operatori del mondo della ricerca. Sono stati lanciati Joint Programmes, fra cui quello sulle CCS di cui ENEA è uno dei partner principali.
- *Iniziative progettuali internazionali.* Sono stati presi contatti con gli operatori cinesi, nell'ambito di una collaborazione già avviata fra Cina ed ENEL, ed australiani per la costruzione di progetti comuni finanziabili anche da UE; si è proseguito nella partecipazione al progetto ECCSEL; sono stati avviati contatti per collaborazioni con ALSTOM e FOSTER WHEELER.
- *Summer School sulle CCS.* E' stata avviata la prima edizione di un'iniziativa che continuerà in maniera stabile per i prossimi anni, con l'obiettivo di diventare un punto di riferimento internazionale anche attraverso il coinvolgimento diretto di IEA.

I risultati di questa molteplice attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/227 e relativi Allegati.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

In questa sezione vengono sinteticamente descritte le attività affidate e svolte dai soggetti cobeneficiari.

a.1 Sviluppo e test di solventi innovativi, caratterizzati da minori consumi energetici e minor tossicità

Università di Firenze, Dipartimento di Chimica

Sviluppo e test di ammine diluite in liquidi organici (tecnologia "water free") e di soluzioni basiche di "resorcinolo". E' stato approfondito in particolare l'aspetto "rigenerazione". L'attività è stata condotta in laboratorio su un loop in configurazione "batch" o in ciclo continuo, per sperimentare le fasi di assorbimento e desorbimento con rigenerazione del solvente, valutando l'efficienza di cattura di CO₂ e tutti i bilanci di massa e di energia. L'attività sul resorcinolo, condotta in stretto coordinamento con ENEA, ha approfondito anche gli effetti di avvelenamento del catalizzatore.

Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali

- Analisi dinamica e controllo di impianti CCS di tipo post-combustion (impianto USC), al variare delle condizioni di esercizio. Con l'obiettivo di sviluppare uno strumento adeguato al controllo dell'impianto al variare delle condizioni di esercizio, si è proceduto al miglioramento del modello dell'impianto, con particolare riguardo all'assorbitore e allo stripper, nonché alla progettazione di un sensore software per la stima della CO₂ uscente dai gas trattati.
- Studio dell'integrazione di un impianto USC dotato di dispositivi CCS (post-comb.), con fonti rinnovabili (solare a concentrazione) per il soddisfacimento totale o parziale delle richieste energetiche del processo di cattura con ammine, in particolare della fase di rigenerazione del solvente e di compressione della CO₂.
Lo studio è stato realizzato attraverso una complessa modellistica sviluppata con l'ausilio dei codici commerciali Aspen-Plus e Gate-Cycle per le sezioni USC e CCS, del codice Meteororm e di codici specificamente sviluppati "in house" per la sezione solare, che ha permesso di quantificare gli effetti dei principali parametri operativi e delle differenti configurazioni adottate sulle prestazioni degli impianti.
Infine nell'ultima parte della ricerca sono stati valutati gli effetti dell'integrazione tra il campo solare e la sezione CCS dell'impianto USC.

b.1 Ottimizzazione del processo di gassificazione. Trattamento e conversione del syngas. Sviluppo di un innovativo processo di piro-gassificazione

Università di Cagliari, Dipartimento di Chimica e Geologia

Trattamento e conversione del syngas per produzione di SNG attraverso un processo catalitico di idrogenazione di CO e CO₂. La tecnica viene implementata anche con riferimento alle problematiche connesse all'uso di carboni di basso rango.

L'attività è stata volta in particolare alla messa a punto dei catalizzatori e del relativo processo di fabbricazione. Ciascun catalizzatore realizzato è stato caratterizzato in termini di efficienza di conversione CH₄/CO₂.

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Chimica

Studio e messa a punto di una tecnica per la rimozione del tar e della CO₂ dal syngas. A tal fine viene proposto il processo di dry reforming in cui il tar reagisce con la CO₂ ottenendo CO e H₂. Per favorire la cinetica del processo è necessario l'utilizzo di un catalizzatore. Al fine di ottimizzarne la scelta, sono stati provati diversi tipi di catalizzatori a base di Ni e Ce, supportati su allumina, che hanno mostrato una buona attività catalitica. In conclusione si è ottenuta un'elevata efficienza di rimozione del tar, con una riduzione della sua percentuale nel syngas rispetto al processo non catalitico del 87%. Si riesce così a recuperare la maggior parte del potere calorifico contenuto nel tar e a diminuire la diluizione del syngas dovuta alla presenza di CO₂, ottenendo un gas con alto potere calorifico, composto principalmente da CO, H₂ e CH₄.

b.2 Produzione di combustibili liquidi da carbone e contemporanea applicazione di tecnologie CCS

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia

Sperimentazione, su scala laboratorio, della sintesi Fischer Tropsch (FT), testando differenti tipologie di catalizzatori e differenti condizioni operative.

In una prima fase è stato posto in esercizio dell'impianto di laboratorio ad alta pressione per la sintesi di Fischer-Tropsch, realizzato nel corso della precedente collaborazione. Nel secondo task è stata investigata la reattività di CO, CO₂ e di una miscela CO/CO₂ in condizioni rappresentative per la sintesi di Fischer-Tropsch (220°C, 30 bar, 6000 Ncm³/h/g_{cat}). La reattività, con tre diverse composizioni del gas di alimentazione è stata ampiamente testata con un sistema catalitico la cui composizione molare è 100Fe/10Zn/1Cu/2K. In seguito è stato investigato l'effetto del carico di potassio sulla morfologia/struttura/riducibilità del catalizzatore e sulla sua reattività in presenza di miscela CO/H₂, CO₂/H₂, CO/CO₂/H₂. Sulla base di un'analisi di letteratura volta ad individuare i modelli cinetici utilizzati per descrivere la reattività (in termini di velocità di conversione dei reagenti) dei catalizzatori FT a base di ferro è stato sviluppato un modello che consente di descrivere la velocità di scomparsa di CO tenendo presente sia la reazione di Fischer-Tropsch, che la water-gas-shift. Il modello descrive i dati in maniera più che soddisfacente. L'ultima fase ha riguardato la preparazione e caratterizzazione di catalizzatori in cui il promotore zinco è stato sostituito dal manganese. Tali catalizzatori sono pronti per essere testati nella reazione FT.

b.3 Cattura della CO₂ con sorbenti solidi

Università de L'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale

- Sviluppo di un modello dinamico del processo simultaneo di steam reforming, con produzione di H₂ e CO₂ e contemporanea cattura della CO₂ ("in situ CO₂ capture"). Il modello sviluppato consente di prevedere accuratamente le prestazioni del reattore di decarbonizzazione della piattaforma ZECOMIX;
- Modellazione della produzione O₂ con metodi alternativi al criogenico (membrane inorganiche a struttura perovskitica) per un significativo abbattimento dei costi;
- Analisi di laboratorio su sorbenti solidi sviluppati da ENEA, complementare alla caratterizzazione operata da ENEA;
- Supporto alla messa a punto procedure avviamento del gassificatore e del carbonatore della piattaforma ZECOMIX.

c.1 Metodologie numeriche per la simulazione dei processi e la progettazione di componenti

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Meccanica

Sviluppo di una tecnica "multilivello", implementabile su codice HeaRT, per la simulazione di tipo Large Eddy Simulation (LES), in situazioni ove, la descrizione accurata dei processi turbolenti, richiede un maggiore dettaglio. La tecnica permette di simulare, con la dovuta risoluzione geometrica, le strutture fini (ove presenti) della turbolenza, che sono responsabili del trasferimento di energia cinetica alla scale proprie dei fenomeni chimici, e in definitiva permette simulazioni accurate anche in situazioni reattive complesse.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica e Materiali

Modellazione cinetica chimica delle reazioni secondarie in fase gas dei prodotti di volatilizzazione del carbone. Una modellazione accurata ed affidabile richiede non solo la caratterizzazione della fase di pirolisi, che definisca la quantità e la composizione della fase gas, ma anche la caratterizzazione dei meccanismi cinetici nei quali queste specie sono coinvolte. In quest'ottica è stato sviluppato un meccanismo cinetico ridotto di pirolisi e di ossidazione delle specie volatili formato da 47 specie chimiche (molecolari e radicaliche), da C₀ a C₁₄, coinvolte in 415 reazioni. Il modello semplificato è stato confrontato sia con dati sperimentali di velocità di fiamma, sia con il modello

dettagliato ottenendo un accordo più che soddisfacente. Inoltre la struttura dello schema cinetico lo rende facilmente utilizzabile in codice fluidodinamici come FLUENT e/o OpenFOAM.

Il gruppo del Politecnico di Milano collabora da diversi anni con ENEA all'ambizioso obiettivo di sviluppare un codice completo dettagliato e ridotto (implementabile su codici CFD) di ossidazione del carbone. I moduli sviluppati negli anni precedenti trovano già applicazione nei modelli di combustione sviluppati da ENEA.

c.2 Sviluppo, progettazione e test di bruciatori per turbine a gas

Università di Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria

Ottimizzazione del bruciatore Trapped Vortex (ETVB-mod1) attraverso partecipazione alla sperimentazione sull'impianto MICOS e simulazioni RANS e LES a freddo in appoggio alla sperimentazione, per addivenire a modifiche del progetto ETVB-mod1.

L'attività di ricerca numerico-sperimentale si è concretizzata nello sviluppo e finalizzazione delle tre attività di seguito elencate:

- Caratterizzazione acustica del bruciatore TVC mediante simulazione numerica FEM
- Caratterizzazione sperimentale dell'aeroacustica del bruciatore TVC a freddo ed in condizioni reattive;
- Supporto allo sviluppo del software di acquisizione, e post-processing dei dati e collaborazione allo studio di fattibilità per la realizzazione di un sistema per misure anemometriche utilizzando la tecnica denominata Particle Image Velocimetry (PIV).

Il lavoro è stato svolto in parte presso i laboratori dell'Università ed in parte presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia dove è presente un nuovo modello di bruciatore TVC (ETVB-Mod1) sull'impianto MICOS.

e.1 Stoccaggio della CO₂: realizzazione e sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimico della CO₂. Elaborazione di linee guida per la progettazione e realizzazione di una rete di monitoraggio

Università di Roma Sapienza, CERI

Ampliamento ed esercizio di una rete di monitoraggio geochimico nell'area del bacino minerario del Sulcis, con l'obiettivo di caratterizzare il base-line di emissione naturale di CO₂, preesistente ad una azione di sequestro geologico.

Sviluppo di "linee guida" per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico di CO₂.

e.2 Utilizzo e fissaggio chimico della CO₂

Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile

Carbonatazione di ceneri (fly-ash) da gassificatori (tipicamente ZECOMIX) e rifiuti alcalini industriali dal settore siderurgico, per ottenere materiali inerti utilizzabili in edilizia.

L'attività riguarda in primo luogo la valorizzazione delle ceneri prodotte dall'unità di gassificazione a letto fluido dell'impianto dimostrativo Zecomix. Vengono condotte attività sperimentali finalizzate a separare la componente inorganica da quella organica e ad una loro caratterizzazione chimico-fisica in vista della relativa valorizzazione. In parallelo viene condotta una attività modellistica finalizzata alla valutazione della fattibilità di integrare il processo Zecomix con una unità di stoccaggio di CO₂, basata sul processo di carbonatazione di minerali o residui alcalini. Oltre a caratterizzarne la composizione, è stata sviluppata una procedura di separazione per granulometria e composizione delle ceneri.

In una seconda fase dell'attività, è stata effettuata una stima dei fabbisogni di energia e di materiali associati ad un processo di carbonatazione integrato nella piattaforma Zecomix per stoccare in forma solida la CO₂ emessa. In particolare, sono state ipotizzate due possibili configurazioni derivanti da una diversa collocazione del processo di carbonatazione.

Società Partecipata SOTACARBO S.p.A. ha svolto attività sui seguenti temi:

Nell'ambito del Sub-Task a, SOTACARBO svolge attività in merito alla cattura della CO₂ con solventi classici (ammine), sugli impianti PILOTA e GAIA, per realizzare un controllo on-line del carico di CO₂ sul solvente. Il controllo sarà operato con strumentazione convenzionale on-line (misure di PH e densità: variano in modo significativo con la concentrazione di CO₂) in luogo di analisi fuori linea. Sperimentazione dell'intero loop presso Sotacarbo (impianto GAIA): cattura + rigenerazione.

Nell'ambito del Sub-Task b1, SOTACARBO è impegnata al miglioramento del controllo del processo di gassificazione e co-gassificazione (carbone-biomassa), per favorire un funzionamento stabile e continuo, anche grazie a nuova sensoristica per la diagnostica ed il controllo (T, livello). Attraverso la strumentazione del blanket di refrattario con tc, viene eliminata la sonda centrale che crea camini preferenziali. Viene sperimentata componentistica innovativa (es. nuova griglia anti-deposito) .

Ansaldo Energia

Nell'ambito di un "Accordo di Collaborazione" tra ENEA ed ANSALDO, nonché del gruppo europeo ETN (European Turbine Network), è in corso una fattiva collaborazione sui temi della "fuel and load flexibility " in turbine a gas di grande potenza (tipo V64 e V94, rispettivamente da 75 MWe e 310 MWe).

Nell'ambito di questa collaborazione ENEA ha ricevuto 2 bruciatori per V64 da testare sul proprio banco prova. ANSALDO partecipa agli sviluppi relativi ai test applicativi di strumentazione diagnostica avanzata di ENEA. E' previsto che entro il 2013 ANSALDO acquisterà un sistema diagnostico completo (Sistema ODC) da testare su proprie macchine in collaborazione con ENEA. Nell'ambito di questa collaborazione trovano applicazione gli studi condotti nell'ambito del PAR 2012 (Obiettivo C - Sub-task c2).

La collaborazione coinvolge anche il tema delle microturbine, avendo ANSALDO acquisito nel 2013 il controllo di TURBEC SpA, società italiana costruttrice di piccole macchine da 100 e 300 kWe (T100/T300). ENEA, a tal riguardo, dispone di due macchine T100, la prima installata su piattaforma ZECOMIX, verrà testata con syngas ricchi di idrogeno, la seconda, installata sulla piattaforma AGATUR, verrà provata in condizioni di ossi-combustione $CO_2/O_2/CH_4$.

SOFINTER

La collaborazione, già operativa da alcuni anni, è incentrata sullo sviluppo e qualificazione di una tecnologia di ossi-combustione del polverino di carbone, denominata ISOTHERM-PWR, combustione pressurizzata di polverino di carbone in atmosfera di ossigeno.

La collaborazione è al momento incentrata, con riferimento ai temi dell'Obiettivo C - Sub-task c1, sulla simulazione numerica e sullo sviluppo di modellistica LES idonea a descrivere un processo di combustione trifase cioè la combustione di uno slurry di carbone (mix acqua-carbone) in ossigeno, e sulla diagnostica di controllo.

ALSTOM

È in corso di definizione una collaborazione a tre: ALSTOM-ENEA-SOTACARBO, per la messa a punto di una tecnologia "Chilled Ammonia Process" per la cattura della CO_2 , che prevede, tra l'altro, sperimentazioni su una facility disponibile presso SOTACARBO.

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione

Il nuovo quadro di riferimento che si è delineato in Italia nel corso del 2011 a seguito dell'incidente di Fukushima e del successivo referendum, ha portato ad una nuova rimodulazione delle attività di R&S previste nell'ambito del Programma Triennale 2012-2014.

In particolare, si ritiene che le esigenze primarie siano la conservazione nel nostro Paese di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare la corretta gestione delle residue attività nucleari, in particolare sotto il profilo della sicurezza e le attività di ricerca relative alla IV generazione.

Il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, prescindendo dall'esistenza di centrali elettronucleari in esercizio, a maggior ragione se entro il limite di 200 km dai confini nazionali. La Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione debba effettuare una valutazione indipendente dello stato di sicurezza di questi reattori. E' perciò necessario conservare e rafforzare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca nel settore nucleare, sviluppando in particolare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità.

Rimane chiaro che a seguito del referendum abrogativo riguardante la costruzione e l'esercizio di nuove centrali elettronucleari, si è determinata la necessità di abbandonare le attività di ricerca per lo sviluppo di reattori nucleari fino alla generazione III+. I temi di ricerca riguardano dunque esclusivamente i reattori nucleari di IV generazione in quanto ad elevata sicurezza ed affidabilità e con massimo utilizzo del potenziale energetico del combustibile e controllata gestione dei rifiuti radioattivi.

In particolare le attività riguardano lo sviluppo e implementazione dei sistemi nucleari veloci refrigerati a piombo, Lead cooled Fast Reactor (LFR) e Small Modular Reactor (SMR), su cui l'Italia detiene una posizione di leadership progettuale e tecnologica in Europa, attività che sono inquadrare nelle iniziative internazionali (GIF) ed europee (SNETP, ESNII, EERA) alle quali il nostro Paese ha aderito.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate e tenendo conto delle attività tecniche già avviate in ambito Gen-IV degli studi di sicurezza nelle precedenti annualità dell'AdP, è stato deciso di reindirizzare il Piano Annuale di Realizzazione 2012 relativo su due linee progettuali:

LINEA PROGETTUALE 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

LINEA PROGETTUALE 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

LINEA PROGETTUALE 1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Secondo le indicazioni IAEA (56^a Conferenza Generale: Rapporto del Direttore Generale sullo stato attuale e le prospettive future nel settore nucleare), dopo Fukushima è complessivamente cambiato poco riguardo alle prospettive dell'energia nucleare nel mix energetico mondiale.

Le stime della crescita fatte prima e dopo l'incidente differiscono tra loro solamente per qualche punto percentuale. Nonostante il rallentamento dell'ultimo anno, il settore del nucleare continuerà ad espandersi nei prossimi decenni, guidato da una domanda energetica in crescita, dalla volatilità dei prezzi dei combustibili fossili, dal suo basso impatto in termini di emissioni di gas serra e dalla sicurezza energetica che esso può garantire.

Le stime più alte prevedono una crescita dell'8% inferiore alle previsioni del 2012, mentre le stime più basse prevedono una crescita del 7% inferiore alle stime pre-Fukushima. In particolare, nel 2012 la capacità produttiva mondiale di energia nucleare ammonta a 375 GWe. Le stime più alte prevedono una crescita a 746 GWe nel 2030, mentre secondo le stime più basse la capacità produttiva crescerà fino a 502 GWe nello stesso anno. Tra i paesi non nucleari intenzionati a diventare tali prima di Fukushima, ci sono stati ripensamenti e ritardi, ma la maggior parte di essi ha comunque deciso di portare avanti i propri progetti.

Per quanto riguarda lo stato attuale dell'energia nucleare, nel 2011 la produzione di elettricità a livello mondiale è stata del 12,3%, con un contributo al mix energetico che varia di regione in regione, dal 25% dell'energia utilizzata

in Europa occidentale, all'1,8% in Medio Oriente allo 0% nel sud-est asiatico. Le centrali nucleari operanti oggi nel mondo risalgono per la maggior parte agli anni 60' e 70', con una vita produttiva stimata di circa 60 anni.

Tra i paesi che non possiedono centrali nucleari operative, 29 stati, divisi fra Asia-Pacifico (10), Africa (10), Europa (7) e America Latina (2), hanno adesso concreti programmi di produzione di energia nucleare, a diversi stadi di sviluppo. Ci sono poi anche paesi che hanno adottato misure per l'introduzione del nucleare per la prima volta dopo l'incidente di Fukushima. Questi stati sono Turchia e Emirati Arabi dove i lavori di costruzione della prima centrale nucleare sono già iniziati, e Bielorussia, Bangladesh e Vietnam, che realizzeranno i loro progetti grazie ad accordi di fornitura con la Russia.

Tuttavia molta incertezza rimane circa l'effettivo avviamento dei loro programmi per la produzione di energia nucleare. Si prevede quindi che la crescita del settore nucleare sarà guidata dall'espansione dei programmi dei paesi già produttori di energia nucleare, più che da nuovi programmi in paesi nucleari. I fattori che guideranno tale crescita nei prossimi decenni non sono cambiati dopo Fukushima: domanda energetica in crescita (in particolare nei paesi in via di sviluppo), volatilità dei prezzi dei combustibili fossili, basso impatto in termini di emissione di gas serra e sicurezza energetica.

Al contrario dell'elettricità generata dai combustibili fossili, per l'energia nucleare il costo del combustibile costituisce solo una piccolissima percentuale del costo finale dell'energia. Si stima per esempio che un raddoppio del prezzo dell'uranio si traduca in un aumento del 4% dei costi di produzione (a fronte di un aumento del 40-70% nel caso di combustibili fossili), riducendo sensibilmente la volatilità dei prezzi dell'energia.

Diventa sempre più evidente che la tecnologia nucleare e la safety devono procedere di pari passo. L'incidente di Fukushima ha reso sempre più chiara la necessità di estendere il concetto di progettazione in sicurezza, fino a giungere alla "safety by design", tanto quanto possibile. Il tema della sicurezza delle installazioni nucleari diverrà sempre più centrale e gli stessi enti regolatori imporranno, nei prossimi anni, misure sempre più restrittive, in particolar modo per quanto riguarda gli impianti in costruzione. Tenendo conto delle informazioni raccolte a seguito dell'incidente di Fukushima e delle successive attività di safety assessment, note come stress test, è emerso chiaramente che dalle attività di ricerca dovranno scaturire strumenti migliorati al fine di permettere una sempre più accurata predizione del comportamento degli impianti in fase incidentale e la possibilità che tali evoluzioni possano dare risultati in transitori gestibili direttamente dagli impianti e/o dai sistemi di sicurezza/emergenza in essi previsti. Tutto questo richiederà lo sviluppo di modelli e di strumenti informativi che saranno fondamentali sia nella fase pre-regolatoria, in supporto alle autorità di sicurezza, sia in fase di gestione delle emergenze, in supporto agli operatori.

LINEA PROGETTUALE 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

Per quanto riguarda i reattori di quarta generazione alcuni sono ancora allo stadio concettuale mentre altri come MYRRHA (LFR-ETPP) e ASTRID (DEMO-SFR) sono già in una fase di progettazione avanzata, in vista di richiedere all'autorità di sicurezza l'autorizzazione alla costruzione ed esercizio nel 2014.

I sistemi nucleari di quarta generazione devono rispondere ai seguenti requisiti:

- Sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- Economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- Sicurezza e affidabilità, in termini di bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e ampia tolleranza anche a gravi errori umani, con l'obiettivo finale di non dover richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, escludendo qualsivoglia scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- Resistenza alla proliferazione e protezione fisica tali da rendere non conveniente il furto o la produzione non dichiarata di materiale nucleare o l'uso illecito della tecnologia e da assicurare un'aumentata protezione contro attacchi terroristici.

In ambito europeo lo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR, con particolare riguardo a quelli a spettro neutronico veloce capaci di sostenere la chiusura del ciclo del combustibile per la minimizzazione dei rifiuti radioattivi e l'utilizzo ottimale delle risorse naturali, è inquadrato nella European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) dello Strategic Energy Technology-Plan (SET-Plan), di cui anche l'ENEA è membro.

In tale contesto, l'impegno italiano è focalizzato ai sistemi LFR (anche SMR) nella configurazione a piscina integrata, poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione.

- *Sostenibilità*: efficace utilizzo del combustibile e minimizzazione delle scorie

Il piombo è un refrigerante che presenta una sezione d'urto di assorbimento neutronico bassa e uno scarso potere moderante. Questa proprietà nucleare, intrinseca al refrigerante, permette di progettare ed esercire noccioli a spettro neutronico veloce anche con geometrie con un elevato rapporto refrigerante/combustibile, a sua volta necessario per la corretta asportazione del calore di fissione nel rispetto dei vincoli sulle temperature massime di esercizio.

La possibilità di operare con flussi neutronici particolarmente "duri" consente di ottenere facilmente noccioli con rapporto di conversione unitario (qualora il tasso di produzione di nuovo materiale fissile nel combustibile coincida con il tasso di consumo dello stesso), e quindi noccioli a lunga vita ed elevato tasso di bruciamento (elevata efficienza di utilizzo del combustibile, circa 150-200 volte superiore agli attuali sistemi di seconda e terza generazione).

Un flusso neutronico veloce permette non solo di accrescere la sostenibilità di tali sistemi mediante un utilizzo più efficace e razionale del combustibile nucleare, ma permette contemporaneamente una drastica riduzione della generazione di scorie ad elevata radiotossicità grazie ad un ciclo del combustibile "chiuso". Le scorie effettivamente prodotte sono infatti separate dal plutonio e dagli attinidi minori, che vengono completamente riciclati e riutilizzati nel ciclo del combustibile (detto per l'appunto chiuso). Il plutonio e gli attinidi minori sono, infatti, i principali responsabili dell'elevata radiotossicità delle scorie nucleari dei sistemi GEN-II, GEN-III, che richiedono tempi di stoccaggio in siti geologici dell'ordine del milione di anni.

Con un ciclo del combustibile chiuso i sistemi LFR permettono di ridurre i volumi di scorie nucleari prodotte e la relativa radiotossicità, con la sola necessità di uno stoccaggio in siti superficiali per un tempo dell'ordine di 300-400 anni.

- *Economicità*: costi competitivi e rischio sul capitale investito paragonabile ad ogni altra forma di produzione di energia elettrica

I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere estremamente semplici, riducendo quindi i tempi di costruzione, i tempi di ammortamento del capitale investito (parametro molto critico per i sistemi nucleari), e il costo di produzione dell'energia elettrica.

Tale semplicità è in gran parte consentita dalle intrinseche proprietà del refrigerante utilizzato. Il piombo infatti non interagisce chimicamente con aria e acqua (a differenza del sodio), e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione (praticamente pressione atmosferica) e di installare direttamente nel sistema primario il generatore di vapore, portando ad una considerevole semplificazione impiantistica. Nei sistemi refrigerati a sodio ciò non è praticabile, e un apposito circuito intermedio a sodio è previsto, aumentando la complessità, dimensioni e costi di impianto.

Inoltre la diretta installazione del generatore di vapore nel sistema primario migliora l'efficienza energetica del sistema LFR, riducendo i costi di produzione dell'energia elettrica.

Infine mediante un accorto ed innovativo progetto di impianto, che lo rende estremamente semplice, è possibile sostituire o comunque ispezionare tutti i componenti del sistema primario, incrementando sensibilmente non solo il fattore di utilizzo dell'impianto e riducendo quindi i tempi di ammortamento sul capitale investito, ma anche la protezione dell'investimento.

- *Sicurezza e affidabilità*: elevata sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, minimo rischio di danneggiamento del nocciolo, esclusione di un piano di evacuazione

I sistemi refrigerati a piombo, visto l'elevato punto di ebollizione del refrigerante utilizzato (1750 °C), la sua bassa tensione di vapore anche ad elevate temperature, e le sue ottime capacità schermanti, sono progettati per essere eserciti a pressione atmosferica e a temperature particolarmente lontane dal punto di ebollizione. Ciò consente di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, con un rischio di esposizione agli operatori molto modesto vista la capacità del piombo di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma.

Le ottime proprietà neutroniche del piombo, già citate, consentono inoltre di sfruttare a pieno le peculiarità dello stesso come refrigerante, ovvero da un punto di vista termo-fisico (elevata capacità di asportare potenza termica, elevato calore specifico, elevato coefficiente di espansione termica), permettendo la progettazione di noccioli ad elevato rapporto passo su diametro, il che implica direttamente sistemi a ridotte perdite di carico e quindi contenute potenze di pompaggio. Inoltre tale configurazione permette di incrementare le capacità del sistema di asportare la potenza di decadimento in regime di circolazione naturale, quindi in maniera completamente passiva, permettendo così una sensibile semplificazione dei sistemi di controllo e protezione e accrescendo ulteriormente il grado di sicurezza di tali sistemi.

Da un punto di vista prettamente nucleare i reattori refrigerati a piombo presentano un coefficiente di reattività per presenza di vuoto negativo nel caso di noccioli di piccole-medie dimensioni e positivo nel caso di noccioli di grosse dimensioni. Tuttavia, in virtù dell'elevato punto di ebollizione del refrigerante (superiore alla temperatura di fusione degli acciai ma inferiore a quella del combustibile), l'ipotesi di esteso svuotamento della sola regione del nocciolo può essere considerata fisicamente irrealizzabile, così che i reattori refrigerati a piombo possano essere considerati immuni da uno degli scenari incidentali più gravi, tipici dei reattori veloci tradizionali.

Anche in caso di rottura dei tubi del generatore di vapore, vista l'elevata densità del piombo e le soluzioni progettuali adottate, il rischio di inserzione di vapore nel centro del nocciolo (dove il coefficiente di vuoto è maggiormente positivo) è estremamente ridotto.

Va infine evidenziato come l'elevata densità del piombo, pur nel caso di un'improbabile fusione del nocciolo, riduca significativamente il rischio di una successiva compattazione del combustibile e quindi di una nuova condizione di criticità del sistema. I fenomeni di dispersione del combustibile nel refrigerante sono infatti predominanti viste le densità del combustibile nucleare paragonabili a quelle del piombo e l'attitudine del piombo ad instaurare moti di circolazione naturale in ogni condizione incidentale ipotizzabile. Tale scenario non è invece ipotizzabile per i reattori ad acqua e a sodio, per i quali altresì il rischio di parziale o completa fusione del nocciolo è meno ridotto che non nel caso di un LFR.

D'altro canto l'elevato punto di fusione del piombo (327°C) che può indurre problemi di esercizio e controllo dei sistemi LFR, introduce un enorme vantaggio per quanto riguarda la sicurezza di tali sistemi. In caso di rottura del vessel con fuoriuscita di piombo dal sistema primario, questo tenderebbe immediatamente a solidificare arrestando la fuoriuscita, senza alcuna conseguenza per le strutture circostanti data anche la sua inerzia chimica con aria e acqua. Per i sistemi a sodio ciò non è neanche lontanamente immaginabile.

Rimane infine la questione della produzione del Polonio-210, volatile e altamente pericoloso per la salute pubblica. Con un'adeguata selezione dei materiali e una corretta implementazione dei sistemi di controllo della chimica, e ancora date le attitudini del piombo ad intrappolare i prodotti di fissione altamente volatili, il rischio di rilascio delle pur minime quantità di Po-210 prodotte nel reattore, è estremamente ridotto.

- *Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica*: impossibilità di avere plutonio per la fabbricazione di bombe, elevata sicurezza per la salute pubblica in caso di atti terroristici.

L'uso di combustibile ad ossidi misti contenente attinidi minori (nel lungo termine), associato ad un ciclo di combustibile che non prevede la separazione chimica degli attinidi presenti nel combustibile stesso, rende questi sistemi enormemente inefficaci per la diversione di plutonio a fini illeciti. Inoltre nel breve termine, le proprietà neutroniche del piombo premettono la concezione di noccioli a lunga vita (peraltro già esercibili in un'ottica di chiusura del ciclo del combustibile), intrinsecamente incompatibili con la produzione di plutonio weapon-grade.

L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua, con ottime proprietà intrinseche di schermaggio delle radiazioni e di ritenzione dei prodotti di fissione tipicamente responsabili della contaminazione ambientale in caso di incidente severo, ed operante a bassa pressione permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe alla installazione nucleare, riducendo inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici iniziati da eventi terroristici. Inoltre per i sistemi LFR in nessuna configurazione è previsto l'utilizzo di fluidi infiammabili, eliminando quindi il rischio di propagazione di incendi nel sito.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto si pone come obiettivo lo sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e la implementazione di collaborazioni internazionali per il nucleare di IV generazione.

Il prodotto finale dell'attività è costituito da:

- attrezzature, laboratori e prove sperimentali, modelli, programmi e piattaforme di calcolo validati per la progettazione nucleare e le verifiche di sicurezza e sostenibilità del nucleare da fissione;
- analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari e relativi cicli del combustibile;
- progettazioni e qualifiche di componenti e sistemi per impianti nucleari di quarta generazione;
- sviluppo di materiali per sistemi nucleari innovativi.

Tutto ciò al fine di contribuire allo sviluppo rapido delle competenze e delle infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per un'esauriente valutazione della sicurezza degli impianti nucleari attuali e per contribuire allo

sviluppo degli impianti nucleari di nuova generazione. Tutte le attività sono portate avanti nell'ambito di iniziative internazionali/europee o di programmi bilaterali svolti in collaborazione con istituzioni di ricerca di Paesi coi quali l'Italia ha siglato accordi nel campo dell'energia nucleare.

Le competenze e le infrastrutture che saranno impiegate o sviluppate nell'ambito di questo tema costituiranno un insieme di capacità multidisciplinari che, in collaborazione e sinergia con altri soggetti del settore, potranno essere utilizzate per la riqualificazione ed il potenziamento del sistema scientifico ed industriale italiano in materia nucleare.

Nella presente annualità nel contesto dello sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare (Linea Progettuale 1) si è provveduto a mettere a punto metodi e modelli fisico-matematici per la stima e caratterizzazione di rilasci e dispersione di radionuclidi a seguito di sequenze incidentali, sviluppare e validare piattaforme di calcolo avanzate per l'analisi neutronica, termo-idraulica e degli incidenti severi, sviluppare e qualificare librerie per schermaggio e dosimetria.

Relativamente alla implementazione di collaborazioni internazionali per il nucleare di IV generazione (Linea Progettuale 2), il progetto si è incentrato sulla filiera dei reattori veloci refrigerati a piombo (LFR) e sui sistemi Small Modular Reactor veloci che riscuotono particolare interesse in Europa e da parte dell'industria nazionale.

Le principali attività di ricerca e sviluppo hanno riguardato lo sviluppo e validazione di codici di calcolo per l'analisi termo-fluidodinamica la progettazione di dettaglio del nocciolo, la progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore (SG, DHR, RVACS), lo sviluppo di strumentazione e sistemi di controllo a supporto del progetto.

Si è inoltre provveduto ad avviare, e in parte completare, la caratterizzazione di acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo, di particolare rilevanza per lo sviluppo della tecnologia degli LFR.

Infine si sono implementate infrastrutture di ricerca di enorme rilevanza (HELENA), e aggiornate le infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE), con lo scopo sia di caratterizzare lo scambio termico nel nocciolo, sia di caratterizzare sperimentalmente i sistemi di trasporto termico (DHR, SG).

Nell'ambito del progetto ENEA si è quindi dotata delle necessarie infrastrutture, e delle competenze scientifiche e tecnologiche richieste per affrontare in piena autonomia lo sviluppo tecnologico di un sistema nucleare veloce refrigerato a piombo che sia di riferimento internazionale per la filiera LFR-Gen IV.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE 1: SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE

In Occidente è forte la necessità di rivalutare i margini di sicurezza degli impianti in esercizio o in costruzione e di procedere ad un rinnovato impegno sui temi della ricerca, della riduzione e messa in sicurezza dei rifiuti, della cooperazione internazionale per l'impiego sicuro del nucleare negli usi civili.

In Italia, dove da tempo le centrali dotate di reattori di GEN II sono state fermate, non si ha necessità diretta nel procedere a studi e ad applicazioni per il miglioramento dello standard di funzionamento di questo tipo di sistemi. Nondimeno, come Paese tecnologicamente sviluppato e allineato agli standard degli altri paesi occidentali, l'Italia ha l'obbligo di mantenere vive le conoscenze scientifiche nel campo della fissione nucleare, dando priorità assoluta al mantenimento delle conoscenze nel settore della sicurezza e concentrando i propri sforzi nei settori della ricerca e della cooperazione internazionale per l'impiego sicuro, anche oltre i suoi confini geografici, del nucleare di prossima generazione.

Considerato che il problema della sicurezza nucleare coinvolge tutti i Paesi, a prescindere dall'esistenza nel proprio territorio di centrali elettronucleari in esercizio, nel caso dell'Italia esso si presenta in modo molto concreto, vista la presenza di centrali nucleari entro il limite di 200 km dai confini nazionali. La Commissione Europea ha stabilito che ciascuna nazione si attrezzi per essere in grado di operare valutazioni indipendenti dello stato di sicurezza di queste centrali. Risulta quindi evidente quanto sia necessario conservare e rafforzare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca nel settore della sicurezza nucleare del nostro paese.

La partecipazione consentita dall'AdP alle iniziative e piattaforme Europee come SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) ed ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) per la definizione di una strategia europea sulla produzione economica, sicura e sostenibile dell'energia nucleare, ha permesso all'ENEA di essere presente in diversi progetti europei del VII Framework Program EURATOM, indirizzati allo sviluppo/validazione di strumenti e metodi innovativi per l'analisi della sicurezza negli impianti nucleari, tra cui si ricordano i

progetti SARNET2, SARGEN-IV, JASMIN, NURESAFE. Le attività condotte da ricercatori ENEA in questi progetti sono fortemente sinergiche con quelle svolte in ambito LP1 del PAR 2012 per mantenere e sviluppare le competenze nel campo della sicurezza nucleare.

Queste attività fanno riferimento ad esperienze acquisite nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione con vari enti e università e ad accordi bilaterali, in particolare stipulati con le organizzazioni francesi CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ed IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), ma anche con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission).

Sulla base di questo background, nelle attività inserite in questa linea di attività è ora possibile aumentare le conoscenze di base e di arricchire l'esperienza precedentemente maturata. Le attività previste, principalmente svolte in un contesto internazionale, riguardano l'acquisizione degli strumenti, delle metodologie e delle tecnologie più avanzate che permettano una valutazione indipendente circa la sicurezza, sostenibilità e affidabilità delle concezioni innovative oltre che delle installazioni nucleari attuali.

La linea progettuale 1 si articola in tre macro-obiettivi.

a. Acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità

L'obiettivo prevede l'acquisizione, sviluppo e validazione di codici e metodi per studi ed analisi di sicurezza e sostenibilità, garantendo un adeguato training per il loro corretto utilizzo. Questi strumenti, in gran parte oggetto di accordi di collaborazione con gli enti francesi CEA e IRSN, sono relativi alle diverse tematiche implicate nel funzionamento di un sistema estremamente complesso come un impianto nucleare: modellistica di base per la realizzazione di librerie di dati nucleari, codici di neutronica deterministici e Monte Carlo per l'analisi neutronica del reattore, piattaforme di calcolo avanzate con capacità "multi-scale" e "multiphysics" per la simulazione T/H dell'intero impianto e di specifici componenti, codici di calcolo per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi, modellistica per la valutazione del rilascio e della diffusione dei contaminanti radioattivi metodi per la valutazione degli impianti nucleari sotto l'aspetto della resistenza alla proliferazione nucleare ed agli aspetti tecnici ed economici di interfaccia safety-security.

a.1 Dati nucleari e librerie per schermaggio e dosimetria

Studi sugli effetti di struttura nucleare sulla fissione neutronica di ^{239}Pu

E' importante premettere che lo spettro energetico discreto e continuo del nucleo composto ai picchi della barriera di fissione (stati di transizione di Bohr) e nelle buche intermedie (stati super-deformati e iper-deformati) gioca un ruolo fondamentale nel calcolo della sezione d'urto di fissione. Una valutazione teorica della parte collettiva dello spettro può essere compiuta mediante il modello di sistema dinucleare, che tratta la funzione d'onda del nucleo composto come la sovrapposizione di una configurazione mononucleare e di configurazioni a due aggregati in modo dinamico, consentendo uno scambio di nucleoni degli strati energetici superiori fra gli aggregati. L'impatto dello spettro teorico sulla sezione d'urto di fissione indotta da neutroni e, in combinazione con una versione perfezionata del modello del punto di scissione, sulla distribuzione angolare dei frammenti di fissione, è valutato per isotopi del plutonio d'interesse per le applicazioni energetiche. Nel modello statistico delle reazioni nucleari le sezioni d'urto di fissione dipendono dalla penetrabilità delle barriere di potenziale a cui sono soggetti i nuclei composti nel loro stato fondamentale o in uno stato eccitato. La valutazione quantitativa dei parametri della barriera di fissione e delle eccitazioni del nucleo lungo la barriera stessa in modo da riprodurre le sezioni d'urto sperimentali è un problema complesso non ancora completamente risolto. Per quanto riguarda il calcolo dei parametri di barriera, gli approcci teorici si dividono in due classi principali:

- i metodi macroscopici-microscopici, basati sulle correzioni alla Strutinsky delle energie di modello a goccia per effetti di strato e di appaiamento¹⁴;
- le teorie microscopiche del funzionale di densità, non relativistiche¹⁵ o relativistiche¹⁶.

Tutti questi metodi hanno raggiunto un grado elevato di sofisticazione, consentendo per esempio al nucleo che subisce la fissione di assumere una simmetria di equilibrio triassiale in corrispondenza del picco interno di una barriera di fissione doppia e, in corrispondenza del picco esterno, una forma asimmetrica sotto riflessione rispetto a un piano perpendicolare all'asse di simmetria nucleare, in modo da migliorare costantemente l'accordo fra i valori teorici dei parametri di barriera e i valori empirici.

¹⁴ P. Möller *et al.*, Phys. Rev. C 79 (2009) 064304.

¹⁵ S. Goriely, S. Hilaire, A. J. Koning and R. Capote, Phys. Rev. C 83 (2011) 034601

¹⁶ H. Abusara, A. V. Afanasjev and P. Ring, Phys. Rev. C 82 (2010) 044303

Il calcolo delle sezioni d'urto di fissione richiede anche una valutazione coerente degli spettri energetici nucleari discreti e continui in corrispondenza dei picchi e delle buche della barriera: tale calcolo è relativamente semplice per le eccitazioni non collettive per un approccio non relativistico autoconsistente, ma è più complesso dal punto di vista computazionale per le eccitazioni collettive, che richiedono il superamento dell'approssimazione di campo medio. Vale dunque la pena esaminare un modello collettivo macroscopico, il modello di sistema intranucleare, in grado di predire gli spettri collettivi a grandi deformazioni, come possibile integrazione sia degli approcci macroscopici-microscopici che di quelli microscopici alle barriere di fissione e alle relative sezioni d'urto.

Nel rapporto RdS/2013/055 sono descritti il modello di sistema dinucleare e i metodi di calcolo dell'energia potenziale e dell'energia cinetica. Sono poi presentati e discussi i risultati dei calcoli.

Sviluppo di una libreria di sezioni d'urto presso ENEA-Bologna per valutazioni sullo schermaggio dei reattori tipo LWR e la dosimetria del pressure vessel

Si evidenzia che il gruppo Dati-Nucleari del laboratorio ENEA UTFISSM-PRONOC ha prodotto, in formato FIDO-ANISN, una libreria di sezioni d'urto accoppiata neutroni-fotoni, utile per applicazioni nel campo dello schermaggio dei reattori ad acqua leggera (LWR) e applicazioni di dosimetria per il Pressure Vessel. Questa libreria, denominata BUGENDF70.BOLIB, è stata ottenuta nel gruppo di energia neutrone-fotone ($47n-20\gamma$) come fatto nella simile libreria di ORNL BUGLE-96 ed è basata sulla libreria di dati nucleari US ENDF/B-VII.0. La libreria BUGENDF70.BOLIB è stata generata dalla libreria ENEA VITENDF70.BOLIB a gruppi fini ($199n + 42\gamma$) in formato AMPX per applicazioni nel campo della fissione nucleare usando miglioramenti e correzioni ottenuti dalla revisione ENEA-Bologna 2007 del sistema di processamento dati nucleari dell'ORNL SCAMPI. La libreria, basata sul metodo "neutron resonance self-shielding" di Bondarenko, ha le stesse strutture energetiche di gruppo neutrone-fotone ($199n + 42\gamma$) della libreria ORNL VITAMIN-B6 in formato AMPX (basata su dati nucleari ENDF/B-VI.3) da cui la libreria BUGLE-96 è stata generata in ORNL. Un test preliminare della BUGENDF70.BOLIB è stato eseguito tramite calcoli di trasporto 3-D con il codice TORT-3.2 alle ordinate discrete (SN) durante i benchmark PCA-Replica 12/13 e VENUS-3 per lo schermaggio ingegneristico dei neutroni, specificamente concepiti per testare i dati nucleari e i codici di trasporto usati nelle analisi sui LWR per lo schermaggio delle radiazioni e il danno da esse prodotto.

Le attività di questa sub-task sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/2013/056.

a.2 Metodi Monte Carlo e deterministici per analisi di sicurezza nocciolo e stoccaggio combustibile

Uso dei codici probabilistici di tipo Monte Carlo per lo studio del fenomeno noto come "flux tilt" e per lo sviluppo e validazione di nuovi algoritmi utilizzando il metodo "source-iteration"

Sono state sviluppate attività derivanti dalla:

- collaborazione tra ENEA ed IRSN in merito a problemi di sicurezza connessi al riflettore spesso in acciaio di un tipico reattore di GEN III+ di grandi dimensioni.
- necessità di sviluppo di algoritmi Monte Carlo per calcoli di autovalori, come spunto dal fatto che la modellazione di alcune parti dei reattori PWR è al limite delle attuali metodologie e della capacità degli attuali calcolatori.

Per quanto concerne la modellazione dei PWR, l'attenzione è stata posta sul fenomeno del flux tilt. Sono stati effettuati calcoli Monte Carlo per un modello bidimensionale di un benchmark NEA usando la stessa variazione di densità usata precedentemente (variazione di +/- 1,50% in densità negli assembly esterni di quadranti opposti). I risultati sono ottenuti in termini di variazione di potenza in tutti i quadranti per quattro casi: riflettore pesante in acciaio o riflettore di acqua e baffle convenzionale, con o senza flux tilt. Per tutti e quattro i casi sono state ottenute anche le distribuzioni di potenza. Questi calcoli sono stati fatti a supporto di uno studio estensivo con metodi deterministici svolto da IRSN.

Per quanto concerne gli algoritmi Monte Carlo, lo sviluppo consiste in una continuazione di quanto effettuato nella precedente annualità. In quell'occasione il metodo delle super-storie era stato implementato nel codice MCNP. Lo step successivo di modificare la patch del DSA (Direct Statistical Approach) a sorgente fissa per funzionare in modalità di autovalore e poi di combinare il risultato con la patch delle super-storie era stato proposto ma non realizzato. L'algoritmo è ora stato completato ed include alcune nuove opzioni (tallying e riduzione della varianza a seconda della generazione di fissione), così come un numero variabile di generazioni di fissione per super-storia, nonché l'opzione per variare il valore di v per assicurare una presenza ragionevole di neutroni-figli ad ogni normalizzazione. L'algoritmo è stato testato su alcuni casi realistici di reattori a fissione termici e veloci, con tally sia di tipo in-core che ex-core.

Le attività di questa sub-task sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/2013/057.

Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up in reattori pressurizzati (PWR) da 900 MWe

Nell'analisi si fa riferimento al reattore nucleare ad acqua leggera, pressurizzato da 900 MWe. Il PWR da 900 MWe è il tipo di reattore nucleare numericamente più diffuso in Europa. Quattordici delle ventisette centrali frontaliere sono di questo tipo, molte delle quali costruite agli inizi degli anni '70, hanno ormai superato i 30 anni di vita utile. Appare dunque strategico studiare nel dettaglio tali sistemi, focalizzando l'attenzione sugli aspetti che maggiormente impattano sulla loro sicurezza. Nel rapporto RdS/2013/058 si illustra nel dettaglio la neutronica quasi-statica ed per condizioni operazionali, ovvero non incidentali, del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 900 MWe, mettendone in luce i principali punti di forza della safety di nocciolo, ovvero le distribuzioni di temperatura, i grandi margini di sicurezza rispetto alle distribuzioni di flusso e di potenza, il worth dei sistemi di controllo e la loro efficacia. I calcoli sono fatti in teoria della diffusione, idonea per questo tipo di reattore termico, ricorrendo al codice di nocciolo CRONOS-2, usando le librerie di sezioni d'urto efficaci a due gruppi calcolate nella precedente annualità con il codice di cella APOLLO-2. L'accoppiamento con la termoidraulica di nocciolo, essenziale per valutare il feedback termico, è effettuato ricorrendo ai moduli semplificati presenti in CRONOS. Lo studio di alcuni transitori di nocciolo, di interesse per la sicurezza del reattore, è quanto tratta la tematica successiva.

Procedimenti e metodi per l'acquisizione del codice FLICA per l'analisi termoidraulica di nocciolo in reattori PWR

Si parte dal presupposto che l'analisi della sicurezza dei reattori nucleari esistenti è di massima priorità nei programmi di ricerca dell'UE e la capacità di effettuare analisi indipendenti è un obiettivo prioritario anche in paesi come l'Italia, che non hanno reattori in funzione sul proprio territorio né programmi per la loro realizzazione. Per questo è essenziale da parte dell'ENEA dotarsi degli strumenti ottimali per lo studio approfondito della dinamica del nocciolo, specialmente nei transitori incidentali dei reattori di tipo LWR.

Negli studi di dinamica le analisi neutronica e termoidraulica del nocciolo sono strettamente interconnesse avendo ciascuna di esse bisogno degli output dell'altra come dati di input. Inoltre nei transitori incidentali quanto accade nel nocciolo non può essere studiato indipendentemente da quanto succede nel resto dell'impianto. Per questo l'IRSN e il CEA hanno sviluppato una catena di calcolo tridimensionale completamente accoppiata, chiamata HEMERA (Highly Evolutionary Methods for Extensive Reactor Analysis), basata sul sistema di codici francesi SAPHYR, composto da APOLLO2, CRONOS2 e FLICA4 e dal codice di sistema CATHARE2 (Figura 322). Gli obiettivi della catena di calcolo HEMERA sono quelli di operare calcoli best-estimate e di sviluppare schemi di calcolo per le analisi di sicurezza.

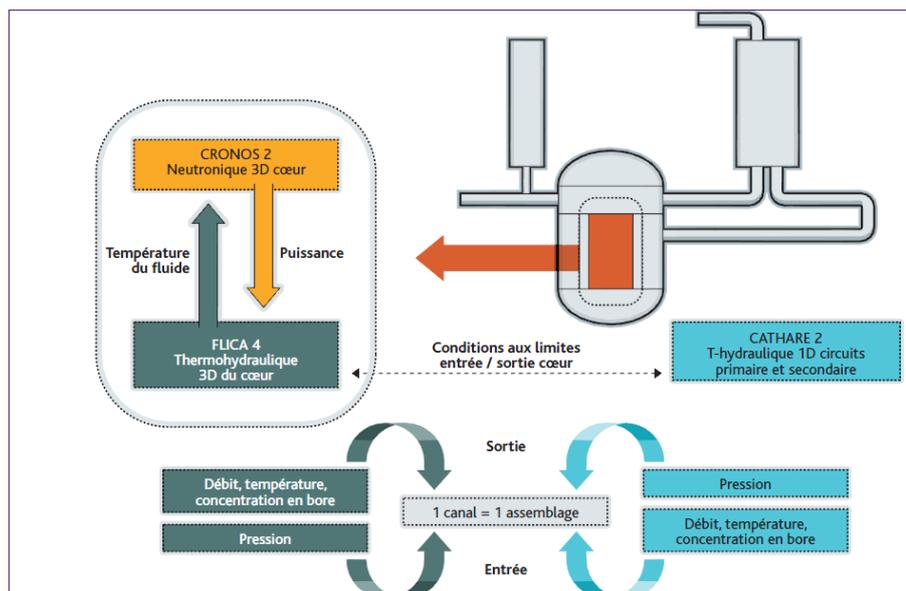


Figura 322. Accoppiamento neutronico-termoidraulico nella catena di calcolo HEMERA

La catena di calcolo HEMERA prevede quindi l'accoppiamento dei seguenti codici:

- il codice neutronico CRONOS2, che determina il comportamento neutronico del nocciolo in 3D;
- il codice termoidraulico FLICA4, che calcola la termoidraulica di nocciolo in 3D;
- il codice termoidraulico d'impianto CATHARE2 che simula, in una dimensione, i circuiti primario e secondario, eventualmente con l'eccezione del nocciolo.

Riconoscendo la validità di questo approccio e la completezza di questo strumento, ENEA ha acquisito negli anni, grazie a collaborazioni con il CEA, tutti i codici di HEMERA ad eccezione di FLICA4, per il quale sono in corso di definizione gli accordi per una prossima acquisizione. Il primo passo per giungere alla acquisizione del codice è costituito dallo studio svolto in questa tematica, consistente innanzitutto in un'analisi dei metodi e delle tecniche che sono alla base dei codici di analisi termoidraulica del nocciolo, passo necessario per comprendere appieno le caratteristiche peculiari dei codici francesi e si è focalizzato successivamente su un'analisi approfondita dei modelli implementati in FLICA4. Nel rapporto RdS/2013/059, che descrivono in dettaglio i passi di questa attività, sono presentati: a) la teoria e i modelli del flusso bifase e del trasporto di calore in acqua, concetti alla base dell'analisi termoidraulica; b) la termoidraulica di nocciolo nei reattori di tipo LWR concludendo con una breve panoramica dei codici più utilizzati; c) gli scopi e i metodi di HEMERA con alcune applicazioni che ne evidenziano le potenzialità.

a.3 Acquisizione, sviluppo e validazione di strumenti di calcolo per la valutazione delle conseguenze di incidenti gravi

Sono qui raccolti i risultati di una vasta ricerca sulla codicistica, di tipo integrale e best-estimate, derivanti da calcoli e valutazioni di sistemi nucleari in cui si sono simulati stati di malfunzionamento che hanno poi condotto a transitori divergenti e quindi ad evoluzioni incidentali gravi. Vengono trattati anche i risultati da codici meccanicistici, orientati a valutazioni dettagliate sulle caratteristiche strutturali di alcuni componenti del nocciolo di un reattore nucleare.

I contributi provengono da attività di ricerca e da considerazioni sull'utilizzo di codicistica integrale e dettagliata nel campo della sicurezza nucleare e della simulazione di incidenti gravi in impianti nucleari provati e di successive generazioni. Essi sono il frutto di lavori eseguiti in ENEA e di attività eseguite in collaborazione con CIRTEN.

In sintesi, le attività trattate in questa task possono essere divise nelle cinque tematiche seguenti:

1. calcoli e valutazioni con l'uso del codice ICARE/CATHARE
2. calcoli e valutazione del comportamento strutturale delle barrette di combustibile con l'uso del codice DRACCAR
3. uso del codice TRANSURANUS per studi di temperatura di fusione per combustibile MOX
4. simulazione di un incidente grave, con l'uso del codice integrale ASTEC, in una tipologia di reattore di nuova generazione, dotato di sistemi di sicurezza passiva
5. simulazione di un incidente grave, con l'uso del codice integrale MELCOR, in una tipologia di reattore di nuova generazione, dotato di sistemi di sicurezza attiva, iniziata a studiare nel precedente PAR nell'ambito delle attività di ricerca svolte dal gruppo mille600, grazie alle quali è stato possibile organizzare e raccogliere tutti i dati e gli schemi d'impianto necessari per operare valutazioni di questo tipo.

La mole dei risultati ottenuti avrebbe richiesto la loro organizzazione in più rapporti tecnici ma, al fine di evitare eccessiva dispersione degli stessi e considerando che la tematica centrale fa riferimento all'uso di codici per valutazioni di stati perturbati di parti e componenti di un sistema nucleare, si è preferito raccogliere il tutto in un unico documento, il rapporto RdS/2013/060.

Calcoli e valutazioni con l'uso del codice ICARE/CATHARE

Si è studiata la fase di evoluzione incidentale severa in cui il nocciolo del reattore resta a lungo in condizioni di scarso raffreddamento, sperimentando un aumento importante della temperatura, favorito anche dall'ossidazione delle guaine in zircaloy. Le alte temperature e la fragilizzazione delle guaine ossidate, possono condurre alla degradazione meccanica ed al collasso delle barrette di combustibile, originando un "debris bed" costituito da frammenti di dimensioni variabili fra 1 e 5 mm. In questa linea tematica si è ampiamente sfruttato, come oggetto di studi e valutazioni, il codice ICARE/CATHARE per la termoidraulica del nocciolo degradato. Nell'ambito di un accordo di collaborazione tra l'ENEA e l'Istituto di Radioprotezione e Sicurezza Nucleare (IRSN) francese, proprietario del codice, sono stati approfonditi gli studi di *debris bed reflooding* a supporto della progettazione del programma sperimentale PEARL, la cui finalità è valutare il raffreddamento di un "debris bed" nelle condizioni rappresentative di degradazione del nocciolo di un reattore nucleare durante un incidente severo. Il programma è finalizzato alla definizione di un database per la validazione di codici di calcolo per incidenti severi come ICARE/CATHARE.

Uno dei risultati interessanti viene qui brevemente sintetizzato, rimandando per i dettagli al già citato documento tecnico generale. In caso si riacquisti la disponibilità d'acqua durante l'incidente, il riallagamento (reflooding) ed il raffreddamento del "debris bed" diventa possibile, anche se più laborioso di quello di un nocciolo integro durante un LOCA, con il normale intervento dell'iniezione d'emergenza, a causa delle temperature più elevate e della maggior difficoltà di penetrazione dell'acqua all'interno del "debris bed".

Le attuali conoscenze del comportamento del debris bed, durante la fase di reflooding, provengono da un numero limitato di esperienze, realizzate principalmente negli anni '80. Lo scopo del programma sperimentale PEARL è quello di estendere la gamma delle condizioni termoidrauliche dei precedenti esperimenti, considerando temperature e pressioni più elevate. Un altro obiettivo del programma sperimentale è lo studio dell'impatto di eventuali effetti 2D/3D sul raffreddamento del debris bed durante il reflooding.

Un dispositivo preliminare chiamato PRELUDE, di dimensioni inferiori rispetto a PEARL ed operante solo a pressione atmosferica, è già stato realizzato dall'IRSN per ottimizzare il riscaldamento ad induzione ed i sistemi di misura che saranno utilizzati nel dispositivo PEARL. Gli esperimenti in PRELUDE sono iniziati nel 2011.

Obiettivo principale del lavoro svolto in questa tematica è di supportare l'IRSN sulla definizione della matrice sperimentale del programma PEARL e delle specifiche di prova. A tale scopo, si sono eseguiti alcuni calcoli esplorativi con il codice ICARE/CATHARE, i cui risultati sono presentati in dettaglio nel rapporto RdS/2013/060, nei quali sono riportati anche la descrizione del dispositivo sperimentale PEARL, il modello di simulazione del dispositivo PEARL, il caso BASE della matrice sperimentale, le caratteristiche del debris bed, le condizioni di prova e i risultati ottenuti. Questa parte della ricerca si è conclusa con una serie di calcoli di sensibilità per aumentare le conoscenze sui coefficienti di scambio termico parete-fluido, sulla permeabilità e passabilità relative del debris bed, sulla portata d'acqua durante il reflooding e caratteristiche del bypass.

Si sono, in particolare, valutati gli effetti sul raffreddamento del debris bed dei seguenti fattori:

- incertezze sui modelli del codice
- portata d'acqua durante il reflooding
- caratteristiche del debris bed.

I calcoli esplorativi, eseguiti con il codice ICARE/CATHARE, consentono di trarre le seguenti conclusioni:

- lo studio parametrico sui modelli del codice, relativi al trasferimento di calore fluido -struttura e alla permeabilità relativa del fluido bifase (acqua -vapore), dimostra che le incertezze considerate influenzano in modo trascurabile la progressione assiale del fronte di quenching;
- gli effetti 2-D durante il reflooding del debris bed, denotati dalla penetrazione preferenziale dell'acqua attraverso la parte più esterna del debris bed (avanzamento più veloce del fronte di quenching rispetto alla parte centrale del debris bed), dipendono principalmente dalla portata d'acqua considerata.
- le caratteristiche del debris bed ed in particolare la presenza di una zona esterna più porosa e permeabile (bypass), hanno un impatto trascurabile sulla progressione preferenziale dell'acqua e l'avanzamento del fronte di quenching.

L'effetto della portata d'acqua e delle caratteristiche del bypass, sul quenching del debris bed, è sintetizzato dalla Figura 323, che riporta la velocità assiale media del fronte di quenching in funzione della portata d'acqua, distinguendo il centro del debris bed riscaldato dalla parte esterna del bypass.

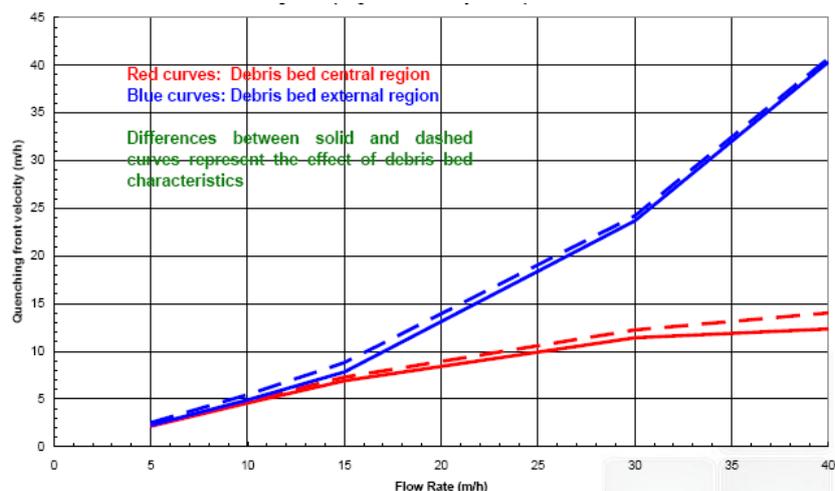


Figura 323- Velocità assiale media del fronte di quenching in funzione della portata d'acqua

Calcoli e valutazione del comportamento strutturale delle barrette di combustibile con l'uso del codice DRACCAR

Questa linea di attività è dedicata agli approfondimenti relativi all'uso del codice meccanicistico DRACCAR, in corso di sviluppo all'IRSN, allo scopo di simulare, in modo più dettagliato rispetto ai codici di sistema come CATHARE2, il comportamento termo-meccanico e termo-idraulico di un elemento di combustibile di un reattore pressurizzato ad acqua (PWR), durante un incidente di perdita del refrigerante primario (LOCA).

Nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra l'ENEA e l'IRSN francese, il codice DRACCAR è stato sottoposto ad una prima verifica dei modelli termo-meccanici e termo-idraulici utilizzando, come base di confronto, i risultati del codice di sistema CATHARE2 con il quale l'IRSN ha simulato il comportamento di un PWR francese (1300 MWe di potenza) a seguito di un LOCA, iniziato da una rottura (15 pollici) nella gamba fredda di un circuito del reattore, a valle della pompa di alimentazione.

I calcoli DRACCAR sono stati realizzati simulando una geometria semplice, limitata ad una piccola sezione quadrata di un elemento di combustibile, senza considerare effetti 3D nel comportamento termo-meccanico della barretta di combustibile, non contemplati nel codice CATHARE2.

Il confronto con il codice CATHARE2, ha permesso di verificare le buone prestazioni del codice DRACCAR che, nonostante lo stadio preliminare di sviluppo, simula in modo adeguato tutti i fenomeni attesi durante l'incidente di perdita di refrigerante primario.

Qualche discrepanza fra i due codici è stata individuata durante la fase di reflooding e quenching. Il modello termo-idraulico di DRACCAR, basato su 5 equazioni di bilancio contro le 6 equazioni del codice CATHARE2, è probabilmente la causa principale del disaccordo riscontrato. Alla conclusione di tale confronto, si sono individuati, anche se in via preliminare e soggetti a possibili variazioni, gli elementi portanti dell'attività di ricerca, mettendo in evidenza anche le opportunità ulteriori, per ENEA, aperte dalla collaborazione con IRSN.

Uso del codice TRANSURANUS per studi di temperatura di fusione per combustibile MOX

Il codice TRANSURANUS è stato utilizzato per studi sulla temperatura di fusione per il combustibile di tipo MOx per applicazioni relative ai Fast Breeder Reactor (FBR). La temperatura di fusione del combustibile è una delle proprietà fondamentali per la progettazione di sistemi nucleari e la valutazione delle loro prestazioni di sicurezza in condizioni normali ed incidentali. Temperatura di fusione, di solito intesa come "solidus temperature", scende sotto irraggiamento a causa dell'accumulo di prodotti di fissione nella matrice. Nel combustibile MOX per FBR, l'elevato contenuto di plutonio ha un ruolo di primo piano.

Questo lavoro è una rassegna di una serie di risultati sperimentali e, sulla loro base, porta a considerazioni sull'assessment del codice TRANSURANUS. Allo scopo di migliorare le prestazioni del codice, si è indagata anche l'accuratezza di altri modelli pubblicati in letteratura al fine di identificare le correlazioni più promettenti.

Simulazione di un incidente grave, con l'uso del codice integrale ASTEC, in una tipologia di reattore di nuova generazione, dotato di sistemi di sicurezza passiva

Questa linea di attività è stata portata avanti in collaborazione con CIRTEN (Università di Bologna) e, in analogia alla ricerca sviluppata nella precedente tematica, sono state condotte investigazioni sulla capacità del contenimento nel trattenere i prodotti di fissione e sullo stato fisico dei radionuclidi al suo interno (gas, vapore, aerosol). In questa linea di attività è stato simulato uno scenario di incidente grave in un reattore ad acqua pressurizzata per mezzo del codice ASTEC. Tutti i fenomeni fisico-chimici sono descritti dal codice, ad eccezione dell'esplosioni di vapore all'interno del recipiente in pressione e delle sollecitazioni meccaniche sul contenimento. L'obiettivo del presente studio è stato quello di indagare le potenzialità offerte dal codice attraverso un calcolo integrale e la verifica delle possibili interazioni codice-utente. Tale approccio permette di considerare la complessità dei fenomeni coinvolti le cui possibili interazioni tra loro costituiscono un contenuto innovativo nell'ambito dell'analisi di sicurezza dei reattori nucleari. Quanto affermato diventa ulteriormente valido in quanto il codice ASTEC è in fase di sviluppo da parte della cordata franco/tedesca (IRSN/GRS) e l'ENEA contribuisce in modo rilevante alla validazione del codice proprio attraverso la simulazione di varie sequenze incidentali gravi in diverse tipologie d'impianto. Nell'analisi dei risultati ottenuti si porta ampio dettaglio descrittivo sul rilascio dei prodotti di fissione, sulla produzione di idrogeno, sul comportamento dei prodotti di fissione all'interno del contenimento, sullo iodio e sul termine sorgente di riferimento per il rilascio all'ambiente esterno alla centrale.

Simulazione di un incidente grave, con l'uso del codice integrale MELCOR

Questa linea di attività è portata avanti in collaborazione con CIRTEN (Università di Pisa) e per l'attuale annualità, ha riguardato la verifica del codice MELCOR nella simulazione integrale degli incidenti gravi ed in particolare l'analisi della risposta di un impianto nucleare avanzato, di tipologia denominata Mille600, a diverse sequenze

incidentali severe, aventi come evento iniziatore la perdita completa di alimentazione elettrica. Le analisi sono state condotte utilizzando il codice MELCOR, che permette di simulare i più importanti fenomeni che possono avvenire sia nel circuito primario che nel sistema di contenimento dell'impianto durante la sequenza incidentale fino all'interazione tra il corium fuso e il basamento della cavità, consentendo in definitiva di valutare il termine di sorgente associato ad una determinata sequenza incidentale.

Scopo fondamentale del lavoro è stato la valutazione delle capacità operative della combinazione codice-utilizzatore nella simulazione di un incidente severo nell'impianto preso a riferimento, con una particolare attenzione all'analisi dei risultati predetti dal codice MELCOR a fronte di diverse strategie per la ritenzione in-vessel o per la refrigerazione ex-vessel del corium fuso.

Nel rapporto completo dopo una breve descrizione dell'impianto Mille600, sono illustrate le modifiche apportate ad una nodalizzazione precedentemente sviluppata per il codice MELCOR, in modo da poter tener conto sia della dinamica dei radionuclidi rilasciati dal nocciolo durante l'incidente, sia dell'interazione tra corium fuso e cavità del sistema di contenimento.

Sono state analizzate quattro sequenze incidentali severe caratterizzate da una significativa degradazione del nocciolo, nelle due ipotesi di allagamento della cavità del contenimento e ritenzione del corium fuso all'interno del vessel (in-vessel retention) e di sfondamento della testa inferiore del vessel con refrigerazione e contenimento del corium nella cavità del reattore (ex-vessel retention).

E' importante evidenziare che la tipologia di impianto considerata rientra tra i PWR e lo studio riguarda i fenomeni di pressurizzazione lenta del contenimento. Negli studi sviluppati in questa annualità non sono stati presi in conto fenomeni quali il Direct Containment Heating e l'esplosione di vapore che, nel caso di sequenze ad alta pressione del sistema primario, potrebbero provocare importanti sollecitazioni al sistema di contenimento.

Questi argomenti aprono la via a possibili nuovi campi d'indagine su temi ancora in fase di discussione e valutazione presso la comunità scientifica internazionale, quindi di elevata rilevanza ai fini della safety e del mantenimento/aumento delle competenze a livello nazionale.

a.4 Metodi per valutazioni di sostenibilità

Congruentemente alle attività delle precedenti annualità, sono proseguite le attività di sviluppo e monitoraggio di metodologie trasversali allo sviluppo di reattori di nuova generazione e, come nel caso di non proliferazione, safety e security imprescindibili anche per la sostenibilità delle attività nucleari nazionali residue a seguito della discontinuità sul programma nucleare nazionale.

Sono stati analizzate metodologie per: valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica, security e interfaccia con la safety, sostenibilità del ciclo del combustibile, piattaforma tecnologica IGD-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform). E' stata inoltre sviluppata una metodologia in grado di fornire una mappa delle emissioni specifiche e del costo medio di generazione di diversi mix energetici.

Valutazioni PR&PP (Proliferation Resistance & Physical Protection)

Uno degli eventi più interessanti di questa annualità, per quanto riguarda le metodologie per valutazioni di resistenza alla proliferazione (PR), è stato la pubblicazione a marzo 2013 dello studio effettuato dalla Accademia Nazionale delle Scienze americana (NAS) "Improving the Assessment of the Proliferation Risk of Nuclear Fuel Cycles". Lo studio è stato commissionato dal Department of Energy Office of Nuclear Energy (DoE-NE) e dalla National Nuclear Security Administration (NNSA) Office of Nonproliferation and International Security con l'obiettivo di migliorare le metodologie a disposizione dei decisori politici per valutare il rischio di proliferazione dei cicli del combustibile nucleare. Lo studio ha avuto una certa rilevanza negli USA perché le decisioni che vengono prese, anche sulla base di queste valutazioni, influiscono sul finanziamento di programmi di ricerca o su accordi bilaterali con altri stati (e.g. esportazione di tecnologia nucleare).

Questo studio è stato richiesto da DOE-NE e NNSA per via del numero crescente di paesi che, nonostante Fukushima, vogliono iniziare o espandere programmi nucleari e della preoccupazione che uno di essi possa iniziare programmi militari nucleari grazie alla tecnologia acquisita per scopi energetici. Inoltre, già da alcuni anni ci sono dubbi sul fatto che le metodologie sviluppate per valutare la resistenza alla proliferazione di un certa tecnologia o ciclo del combustibile possano essere utili nel processo decisionale più politico, ad esempio sull'esportazione di tecnologia, in quanto in questo caso dovrebbe essere considerato il rischio di proliferazione.

In ambito IAEA-INPRO è iniziato, a febbraio 2012, il progetto denominato PROSA (Proliferation Resistance and Safeguardability Assessment Tools) che si concluderà a febbraio 2014. Lo scopo del progetto PROSA è lo sviluppo, partendo dalle metodologie GIF PR&PP e INPRO-PR, di un set coordinato di strumenti per valutare resistenza alla

proliferazione e salvaguardabilità, con l'intenzione di rendere più semplice e utile il processo di valutazione PR sia per sviluppatori che utilizzatori della tecnologia nucleare. L'idea di semplificazione adottata nel progetto si basa sull'utilizzo di un approccio differenziato a seconda dell'uso che intende farne l'utilizzatore della metodologia o il mandante della valutazione. Il lavoro procede in parallelo con altre attività INPRO, cioè la riconsiderazione dei Manuali INPRO, incluso il Manuale PR per la cui revisione PROSA dovrebbe fornire delle raccomandazioni.

Le aspettative di revisione del manuale sono:

- revisione degli User Requirements di INPRO e dei Criteri e Limiti di Accettabilità associati;
- maggiore chiarezza e logicità delle tabelle di valutazione;
- introduzione di nuove valutazioni;
- eliminazione, per quanto possibile, di tutti gli aspetti soggettivi introdotti dall'*expert judgement*;
- maggiori spiegazioni su come effettuare un approccio differenziato a seconda dell'uso e come usare la valutazione PR a supporto della "gap analysis" e pianificazione per la sostenibilità effettuata dallo Stato.

La metodologia PR&PP sviluppata dal GIF PR&PP WG è stata revisionata negli anni scorsi e la nuova revisione completata a fine 2011 ed è disponibile sul sito del GIF¹⁷ dal 2012. Le principali modifiche hanno riguardato le istruzioni per l'utilizzo, il processo di "expert elicitation" (oggetto di commenti da parte dello studio del NAS) e infine approfondimenti su alcune metriche.

Per promuovere e facilitare l'utilizzo di questa metodologia sono organizzati regolarmente workshop con gli utilizzatori e valutatori, generalmente in concomitanza con le riunioni annuali del PR&PP WG.

La metodologia GIF ha una forte connotazione ingegneristica e incoraggia il suo utilizzo fin dalle prime fasi di progetto per introdurre quanto prima elementi che rafforzano la resistenza alla proliferazione e protezione fisica (concetto di PR&PP by design). Questo concetto è strettamente legato a quello della salvaguardabilità e "safeguards by design".

Questo tema è affrontato direttamente da diversi paesi coinvolti in progettazione e installazione di nuovi impianti e, a livello internazionale, dalla IAEA. I numerosi programmi per Small Modular Reactors Programs in diversi paesi ha ulteriormente stimolato questo approccio. A tal riguardo si cita il rapporto "Options to Enhance Proliferation Resistance of Innovative Small and Medium Sized Reactors" che verrà emesso a breve dalla IAEA e alla cui preparazione ha contribuito ENEA.

Security e interfaccia con la safety

A livello internazionale il tema della Nuclear Security è dominato da anni dal processo Nuclear Security Summit (NSS). Iniziato a Washington nel 2010 dopo il discorso del Presidente Obama in cui si impegnava a mettere in sicurezza il materiale nucleare sensibile (plutonio e uranio altamente arricchito) entro quattro anni, è proseguito nel 2012 con un Vertice a Seoul: il terzo appuntamento si terrà a L'Aia a marzo 2014. A giugno di quest'anno il Presidente Obama ha annunciato che nel 2016 ospiterà il quarto NSS, che potrebbe essere l'ultimo, per lo meno in questo formato. Tutti gli eventi importanti sulla nuclear security, in primo luogo la Conferenza IAEA, tengono conto dei risultati e delle aspettative create dai Communiqué del NSS.

Nel corso della presente annualità sono iniziati studi sulle metodologie da applicare nel caso di evento di origine dolosa (security) in un reattore di ricerca per valutare le conseguenze sulla popolazione e ambiente fuori dall'area dell'impianto. Il lavoro parte dalle metodologie per calcolare il termine sorgente (sezioni d'urto, bruciamento, ecc.) fino ad arrivare all'uso dei codici di trasporto atmosferico e valutazione di dose effettiva totale (TED).

Nel rapporto RdS/2013/061 si entra in dettagli relativi a questa tematica e alla necessità di promuovere sempre più il concetto di "Nuclear Security Culture" fino a giungere allo scopo finale, vale a dire alla concreta applicazione della filosofia della Safety & Security by design.

Sostenibilità del ciclo del combustibile

Per Ciclo del Combustibile Nucleare (Nuclear Fuel Cycle, NFC) sostenibile si intende l'insieme complesso di concetti e azioni scientifiche, tecnologiche, economiche e socio-politiche necessarie a garantire un approvvigionamento energetico: sicuro, ecosostenibile, economico e costante nel tempo. Il potenziale contributo alla domanda energetica dell'energia di origine nucleare dipende essenzialmente dalla risposta sulla sostenibilità (o meno) del ciclo del combustibile nucleare, nei termini ora esposti.

Nel rapporto RdS/2013/061 vengono esposti e sviluppati alcuni aspetti propriamente tecnico-scientifici legati alla sostenibilità. Si tratta di studi e/o risultati di studi ottenuti anche in ambito di attività internazionali, a cui l'ENEA partecipa attivamente, quali IAEA/Department of Nuclear Energy e OECD/NEA. La valutazione complessiva, sulla

¹⁷ www.gen-4.org/Technology/horizontal/PRPPPEM.pdf

sostenibilità o meno del ciclo del combustibile nucleare, non può prescindere da un'analisi complementare degli aspetti economici e socio-politici. Alcuni concetti sono stati già introdotti nei documenti preparati nelle annualità precedenti e qui vengono ripresi per "integrità" e completezza dell'esposizione.

La sostenibilità del ciclo del combustibile nucleare non si riferisce a un singolo reattore, bensì ad uno o più gruppi di reattori a sostegno di una scelta di approvvigionamento energetico. Le metodologie per valutare la sostenibilità di un ciclo devono quindi partire da considerazioni sia di scelta energetica, sia tecniche, con lo scopo di individuare parametri, processi, roadmap, punti critici e controreazioni, etc., utili a stabilire da un lato la validità e fattibilità di una scelta energetica, dall'altro l'appropriata soluzione tecnologica. Ciò avviene tramite strumenti di analisi di scenario energetico e di progettazione del reattore, propriamente applicati.

L'analisi riguarda sia la logica dei processi e le prestazioni dei vari componenti del ciclo del combustibile nucleare sui quali l'ENEA ha fornito contributi specifici sia a livello di studi nazionali sia a livello di partecipazione a gruppi internazionali, tipicamente IAEA e OECD/NEA. L'attività ENEA ha riguardato in generale lo sviluppo concettuale dei cicli di combustibili innovativi e, in particolare, aspetti riguardanti lo sviluppo e progetto concettuale di reattori innovativi idonei alla chiusura del ciclo del combustibile nucleare.

Piattaforma tecnologica IGD-TP (Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform).

L'iniziativa per creare una piattaforma tecnologica europea per il deposito geologico dei rifiuti radioattivi "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform (IGD-TP)"¹⁸ è stata ufficialmente lanciata il 12 novembre 2009 a Bruxelles, con lo scopo di coinvolgere tutti gli stakeholder interessati, a vario titolo, alla soluzione del problema dello smaltimento geologico del combustibile nucleare esausto e dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita e per sviluppare una strategia comune di R&S in questo specifico settore. L'ENEA ha aderito alla IGD-TP nel 2010, partecipando ai lavori per la definizione della relativa Strategic Research Agenda SRA. Attualmente (dati 2013) 100 organizzazioni hanno aderito all'iniziativa, fra cui 5 organizzazioni italiane (ENEA, CIRTEN, OGS, Univ. Milano, Vivalda Scientific Services). La piattaforma tecnologica opera attraverso un processo continuo di verifica delle attività in corso e di programmazione di quelle future, secondo un meccanismo che, a partire dalla Vision iniziale, si articola in una agenda strategica (SRA) che poi definisce un piano di sviluppo vero e proprio (Deployment Plan).

Tutte le organizzazioni che aderiscono alla piattaforma possono quindi partecipare, su base volontaria, a delle Joint Actions che si distinguono in:

- Information technology platform (per lo scambio e la fruizione delle informazioni fra i partecipanti)
- Gruppi di lavoro (tecnici e scientifici)
- Gruppi di lavoro organizzativi
- Progetti specifici tecnici (co-finanziati e/o finanziati su base volontaria)
- Trasferimento tecnologico.

L'ENEA, nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA, sintetizza annualmente gli aggiornamenti delle attività della piattaforma IGD-TP, e fornisce una visione strategica di quelle attività più strettamente collegate alle ricerca energetica italiana ed alle necessità del paese. Nel rapporto RdS/2013/061 sono riportati gli aggiornamenti sulle attività della piattaforma IGD-TP, la partecipazione dell'ENEA al forum 2012 ed ai working groups e le future attività in ambito deposito geologico.

Metodologia grado di fornire una mappa delle emissioni specifiche e del costo medio di generazione di diversi mix elettrici

L'originalità dello studio si basa sull'utilizzo di un triangolo equilatero che rappresenta diverse terne di mix di fonti (es., mix di 'fossili/nucleare/rinnovabili' e mix di 'eolico/fotovoltaico/altre rinnovabili'), riferibili a diversi sistemi (es., nazionale, europeo). Il metodo può essere esteso anche ad altri indicatori (es., numero di occupati, emissioni nocive).

Si possono in questo modo rappresentare graficamente e sintetizzare in maniera efficace un gran numero di informazioni, come ad esempio la diminuzione delle emissioni di CO₂ attraverso diverse variazioni di mix implichi diversi costi medi di generazione elettrica finale. Questa metodologia dovrebbe essere ulteriormente rinforzata attraverso lo sviluppo di un'analisi delle incertezze.

Successivamente è stato analizzato (per mezzo del codice COMESE) uno scenario elettrico italiano al 2030 in cui il 50% dell'energia finale viene prodotta da fonti rinnovabili. Sono stati stimati i costi medi di generazione di diverse opzioni di mix e analizzati i limiti di fattibilità tecnica delle singole fonti, applicando infine anche la metodologia

¹⁸ www.igdt.eu

grafica messa a punto. Si possono in questo modo evidenziare maggiormente le opzioni di mix di maggiore interesse.

Queste attività sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS72013/062.

b. Metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali

L'obiettivo è relativo allo sviluppo di metodologie avanzate per la valutazione delle conseguenze incidentali in impianti nucleari tenendo conto dell'evento di Fukushima Dai-ichi e delle risultanze degli stress test europei. In particolare si è operato per la realizzazione di una struttura di base finalizzata alla creazione di un sistema esperto a supporto delle valutazioni di sicurezza per i reattori europei, per l'applicazione di approcci di tipo probabilistico, deterministico ed integrato (probabilistico-deterministico) per la sicurezza di reattori innovativi che tenga conto dell'affidabilità dei sistemi di sicurezza passivi.

b.1 Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o di pre-emergenza

La revisione critica della sicurezza degli impianti nucleari a seguito dell'evento di Fukushima, operata in diverse nazioni del mondo sui vari tipi d'impianto (Stress Test), ha evidenziato la necessità di munirsi di tutta una serie di dati, informazioni di sistema, strumenti di calcolo integrale e meccanicistico, al fine di essere preparati ad operare, nel più breve tempo possibile dopo l'incidente, valutazioni utili per la stima dell'entità del danno immediato e del rischio associato al personale di centrale, alla popolazione e all'ambiente.

Al fine di rendere possibile una tale valutazione per i reattori europei ed in particolare per i siti in prossimità dei nostri confini, si è iniziata un'attività di acquisizione ed elaborazione dei dati e degli strumenti di calcolo per la realizzazione di un data base esperto e di una piattaforma di simulazione focalizzata sugli eventi incidentali, per l'analisi e la previsione del rischio a supporto dei processi decisionali in una eventuale situazione incidentale e di pre-emergenza. Di seguito viene presentato quanto fatto in questa prima annualità con l'avvertenza che la complessità dell'argomento trattato in questa task richiede ulteriori passi nell'attività di ricerca, passi che sono già stati individuati e che verranno compiuti nell'arco delle rimanenti annualità.

La task si sviluppa su quattro tematiche con attività svolte da ENEA e CIRTEN (Università di Bologna e Università Roma "Sapienza").

Calcoli di inventario di nocciolo

La realizzazione di un codice fast running per il calcolo della dose alla popolazione a seguito di un incidente nucleare poggia su tre pilastri fondamentali: il calcolo del termine sorgente, il calcolo del trasporto atmosferico del materiale radioattivo rilasciato espresso dal termine sorgente, ed il calcolo vero e proprio della dose efficace a seguito di immersione nella nube, inalazione, ingestione ecc.. I tre calcoli sono in cascata tra loro: il risultato del primo è da considerarsi come input per il secondo e così via; poiché ognuno di essi è inevitabilmente affetto da incertezze ed errori, sia a livello di modellazione fisica che di calcolo vero e proprio, ne consegue che la stima della dose, risultato finale della catena, può essere affetta da errori consistenti. Si deve pertanto cercare di minimizzare gli errori introdotti e svincolare per quanto possibile il calcolo da evenienze estemporanee legate alle circostanze difficili della gestione dell'emergenza nucleare. L'unico punto su cui si può agire prima di un'emergenza è il calcolo del termine sorgente. Questo può infatti essere calcolato a priori per una serie predeterminata di sequenze incidentali "tipo" e quindi stoccato in un database da usare a seconda del tipo di incidente, senza particolare delay temporale rispetto al decorrere degli eventi reali. La stessa strategia non può purtroppo essere usata per il secondo step del calcolo, il trasporto atmosferico, poiché tali calcoli necessitano di condizioni meteorologiche reali ed in "real time".

I lavori in questa tematica hanno portato alla realizzazione di un database di inventari di nocciolo per le centrali frontaliere, intendendo con questo termine gli impianti nucleari dislocati a meno di 200 km dal confine nazionale. Il database di inventari è a sua volta il primo step concettuale per giungere ad una stima di uno o più termini sorgente; ogni termine sorgente non è altro infatti che una complessa convoluzione dell'inventario di nocciolo fatta ricorrendo ad una funzione che dipende in prima istanza dal tipo di incidente, dal tipo di impianto, dal nuclide, e, in modo esplicito, dal tempo.

La procedura di calcolo per gli inventari di nocciolo, nonché l'elenco degli impianti frontaliere, sono stati ampiamente identificati in lavori svolti nella precedente annualità dell'AdP ENEA-MSE.

Il presente lavoro e il documento tecnico che ne è derivato (RdS/2013/063) sono strutturati in due parti: la prima contiene alcuni affinamenti metodologici non ancora sviluppati nei già richiamati precedenti lavori, necessari ad

un calcolo accurato degli inventari, e la seconda che descrive la strutturazione del database di inventari prodotto. In questa tematica hanno fattivamente collaborato ENEA e CIRTEN (UNIBO).

È bene premettere che il database stesso non può essere reso di dominio pubblico, poiché contiene dati di impianto disponibili a seguito di "Non-Disclosure Agreements (NDA). Quanto contenuto nel documento tecnico, che descrive in modo adeguato questa parte del lavoro attraverso accorgimenti che evitano di incorrere in infrazioni dei detti NDA, è stato preparato in modo da poter essere reso disponibile a chiunque ne sia interessato (libera circolazione).

Il reperimento dei dati di impianto necessari al calcolo degli inventari è da considerarsi segmento fondamentale del lavoro. Al variare dei dati di impianto, ad esempio a seguito dell'adozione di procedure NUPLEX (Nuclear Plant Life Extension) o di Uprating (incremento della potenza termica dell'impianto), si renderà necessario aggiornare i calcoli di inventario. Per quanto detto, si raccomanda una verifica in tal senso con periodicità annuale o al massimo bi-annuale.

Simulazioni e calcolo di incidenti gravi in impianti "frontalieri"

Le attività di ricerca condotte nell'ambito dei precedenti Piani Triennali inerenti l'acquisizione e la validazione di strumenti di analisi per la valutazione della sicurezza degli impianti nucleari sono state inquadrate principalmente nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione bilaterale, sia con le organizzazioni francesi CEA ed IRSN che con l'ente regolatore americano NRC. Tali attività hanno permesso all'ENEA di dotarsi di codici e piattaforme di calcolo avanzati e di acquisire le necessarie competenze per il loro utilizzo.

A livello internazionale, il verificarsi dell'incidente di Fukushima ha messo in luce la necessità di approfondire alcune tematiche fino a quel momento considerate marginali e di studiare evoluzioni incidentali raramente prese in conto nelle attività volte alla valutazione del rischio. Un aspetto da considerare con estrema attenzione deriva dalla presenza di centrali nucleari molto vicine ai nostri confini nazionali e quindi degne di essere studiate in termini di rischio associato e quindi munendosi di tutta una serie di strumenti in grado di poter valutare al meglio le varie sequenze incidentali che si possono verificare nei reattori di dette centrali. Lo svolgimento di tale attività implica la necessità di acquisire strumenti di calcolo necessari all'elaborazione di dati per la realizzazione di un data base esperto e di una piattaforma di simulazione focalizzata su una serie di eventi incidentali opportunamente selezionati.

Tra gli strumenti di calcolo già a disposizione dell'ENEA, adatti a fornire informazioni necessarie per effettuare analisi e previsione del rischio a supporto dei processi decisionali in una eventuale situazione incidentale e di pre-emergenza che potrebbe riguardare il nostro Paese, ricordiamo MELCOR ed ASTEC. Entrambi i codici consentono di simulare in modo integrale l'evoluzione temporale di incidenti severi coinvolgenti un reattore della filiera LWR e di fornire l'inventario di materiale radioattivo da intendersi come possibile carico di rilascio sul territorio, al confine impianto-sito.

Nel documento tecnico prodotto come risultato dei lavori di questa tematica (RdS/2013/064), è riportata la distribuzione sul territorio europeo confinante con l'Italia dei 27 impianti nucleari, raggruppati in 13 siti (6 in Francia, 4 in Svizzera, 2 in Germania ed 1 in Slovenia), che si trovano ad una distanza massima dal confine italiano di 200 km (definite per questo motivo centrali frontaliere).

Dei 27 impianti nucleari frontaliere, 26 sono classificabili come reattori di potenza appartenenti alla filiera dei reattori termici (20 sono del tipo PWR e 6 del tipo BWR), e uno, il PHENIX, classificabile come reattore di ricerca del tipo veloce a sodio. Sulla base dell'esame di tale distribuzione risulta evidente che la maggior parte degli impianti al confine del territorio italiano sono del tipo PWR. Ai fini della costruzione del data base esperto, considerato parte integrante delle attività pianificate nella task b.1, e in considerazione del fatto che dei 20 reattori del tipo PWR, 15 presentano potenza termica pari a circa 900 MWe, per l'attuale annualità si è deciso di preparare un input MELCOR di un impianto del tipo PWR da 900 MWe e di testarne la validità nei confronti di un transitorio del tipo SBO (Station Black-Out). Nel rapporto tecnico prodotto viene descritta, in modo dettagliato, l'attività di ricerca condotta da ENEA in collaborazione con l'Università di Roma "Sapienza" e i principali risultati ottenuti.

Realizzazione di un database esperto per la gestione di situazioni di crisi

Come già richiamato nelle due tematiche precedenti, la revisione critica della sicurezza degli impianti nucleari dettata dalle conseguenze dell'evento di Fukushima ed operata in diverse nazioni del mondo sui vari tipi d'impianto (Stress Test), ha evidenziato la necessità di munirsi di strumenti di valutazione incidentale. Un componente fondamentale di cui disporre per fornire rapidamente risposte in fase incidentale e post-incidentale, è sicuramente un sistema integrato per il calcolo (sia in tempo reale che differito) e la conseguente messa a disposizione al personale interessato, dei termini sorgente riferiti ai reattori appartenenti alle centrali

elettronucleari frontaliere (come già detto, situate entro un raggio di 200 km dai confini nazionali) ed esercite da paesi e società estere.

I termini sorgente, calcolati per mezzo di appositi software a partire dai dati di inventario riferiti ai vari reattori frontaliere ed ai diversi scenari incidentali ipotizzabili, saranno poi resi disponibili, nei formati più opportuni, in modo da poter essere utilizzati quali dati di input nei codici di trasporto e per il calcolo delle dosi.

In questo contesto, compito di ENEA è quello di:

- a. progettare, realizzare e popolare un database finalizzato a contenere i dati relativi agli inventari dei reattori frontaliere, così come ogni altra informazione riferita ai siti nucleari considerati, utile al calcolo dei termini sorgente dei reattori stessi;
- b. progettare e realizzare un apposito software di gestione del database di cui al precedente punto che, per mezzo di appropriati strumenti web, consenta l'aggiornamento del database nonché la visualizzazione e l'esportazione dei dati di inventario, strutturati secondo criteri e formati opportuni, in esso contenuti;
- c. progettare e realizzare un'apposita interfaccia che consenta, in maniera trasparente all'utente, di trasferire i dati di inventario contenuti nel database agli appositi codici per il calcolo del termine sorgente, di mandare in esecuzione i codici stessi (con o senza l'intervento dell'utente) e di memorizzare i dati calcolati;
- d. progettare e realizzare un'integrazione del database di cui al precedente punto a) per consentire l'opportuna memorizzazione dei termini sorgente calcolati, relativi ai reattori frontaliere considerati;
- e. integrare il software di gestione di cui al precedente punto b), in modo da poter selezionare, visualizzare, esportare e/o rendere disponibili ad altri codici (tipicamente i codici di trasporto e per il calcolo delle dosi) o per altri scopi i dati, opportunamente codificati, e relativi ai termini sorgente precedentemente memorizzati.

Per una questione di prontezza operativa, è prassi consolidata che i termini sorgente relativi alle varie situazioni incidentali vengano calcolati preventivamente, in modo da essere già disponibili al momento del bisogno. Ciò non toglie che, una volta individuati e resi disponibili i codici da utilizzare per detto calcolo da parte delle Unità competenti, il software di cui al precedente punto b) debba permettere di estrarre in tempo reale i dati necessari, nonché consentire l'attivazione dei codici utili ad ottenere al momento il termine sorgente relativo ad una determinata situazione eventualmente non considerata all'origine.

Per quanto riguarda l'attività relativa alla attuale annualità, il lavoro, focalizzato sostanzialmente ad attività riconducibili ai precedenti punti a e b, è descritto nei dettagli nel rapporto Rds/2013/065.

Sviluppo di una catena di simulazione fast-running per le fasi avanzate d'incidente

Considerando che questa tematica è strettamente dipendente dai contenuti che devono essere sviluppati nelle tre tematiche sopra descritte, per quanto riguarda le attività relative alla prima annualità, si è decisa un'impostazione volta all'individuazione degli aspetti generali e delle principali caratteristiche di cui deve essere dotata una piattaforma di simulazione ingegneristica per i reattori.

Parte di queste attività sono in fase di sviluppo in un contesto internazionale, grazie a progetti di ricerca e gli esercizi di benchmark eseguiti con i francesi di IRSN, gli americani di NRC, e le organizzazioni internazionali OECD / NEA, IAEA ed ETSO.

Attività preliminari e necessarie per procedere ai lavori contenuti in questa ricerca, sono state:

- la definizione di un termine sorgente semplificato per un PWR;
- il calcolo di un incidente di Station Black-out (SBO) con l'uso del codice MELCOR;
- la definizione delle caratteristiche di software per la gestione del database d'impianto e per l'estrazione delle informazioni rilevanti (termine sorgente in funzione dell'evento considerato).

Il prodotto finale di queste attività mira alla realizzazione di una "banca dati intelligente" da utilizzare nelle prime fasi di un incidente nucleare (es. ore, primo giorno). Tale strumento deve essere inteso come una versione semplificata, fortemente conservativa, per ricavare una stima di prima mano del rilascio di radioattività fornendo un'indicazione approssimativa di quanto di tale rilascio potrebbero influenzare il territorio italiano.

Pertanto, al fine di superare alcune limitazioni intrinseche di tale approccio, e al fine di dare anche un'analisi indipendente dell'incidente NPP, uno strumento complementare deve essere preso in considerazione.

Tale strumento deve poter:

- eseguire analisi "in tempi brevi" dell'incidente;
- essere attivato in tempi brevi (il giorno dopo l'inizio dell'evento incidentale);
- eseguire l'analisi con un livello sufficiente di dettaglio, per simulare tutti i fenomeni rilevanti;

- eseguire in parallelo diverse analisi di sensibilità e di "cliff edges" dell'evento;
- identificare gli scenari più importanti da valutare, a fronte di un insieme di criteri selezionati.

Il rapporto tecnico Rds/2013/066 che fa riferimento a questa tematica descrive brevemente l'architettura della catena di tipo "fast-running" dei codici, tenendo in considerazione le specifiche elencate sopra e considerando lo stato dell'arte già raggiunto nella simulazione degli impianti nucleari di potenza dai codici di simulazione nucleare best-estimate. Il calcolo dell'evoluzione di vari scenari incidentali gravi, analizzati contemporaneamente, è oggi reso possibile grazie all'applicazione del calcolo parallelo ed a software per l'analisi di sensitività e di incertezza (S&U) che consente la preparazione e gestione automatica degli "input-deck". L'output atteso da tale catena può quindi prevedibilmente essere utilizzato come strumento di supporto per la gestione di eventi incidentali su scale temporali superiori al singolo giorno.

b.2 Applicazione di metodologia PSA e IDPSA del tipo Risk-Informed per la stima del rischio da eventi esterni

L'incidente di Fukushima, in Giappone nel 2011, ha evidenziato diverse lacune legate all'utilizzo dell'approccio probabilistico per la valutazione del rischio degli impianti nucleari (PSA, Probabilistic Safety Assessment). Ciò ha richiesto la riconsiderazione e/o il perfezionamento nella applicazione della metodologia probabilistica relativamente alle nuove problematiche emerse a fronte di determinati eventi incidentali: questi includono, per esempio, l'analisi di rischio per eventi esterni.

Un approccio cosiddetto "risk-informed" implica l'integrazione dell'analisi di rischio con le informazioni di tipo deterministico ai fini della valutazione della sicurezza dell'impianto. In questa prospettiva, si presume che l'utilizzo di tecniche di valutazione di rischio possa portare ad un miglioramento della sicurezza dell'impianto ed una più razionale assegnazione delle limitate risorse disponibili.

In questo ambito, l'approccio IDPSA (Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis), cioè l'analisi integrata di sicurezza deterministica-probabilistica promuove l'utilizzo combinato della analisi probabilistica della sicurezza, PSA, e dell'analisi deterministica, DSA (Deterministic Safety Assessment).

Il presente studio ha come obiettivo lo sviluppo di una strategia per la realizzazione di nuovi approcci che fondano considerazioni sia deterministiche che probabilistiche per completare gli strumenti attualmente in uso ai fini dell'analisi di sicurezza. Per esempio il concetto di "Dynamic PSA" (DPSA) è stato proposto al fine di individuare importanti scenari incidentali sconosciuti o inutili conservatorismi.

Sono state affrontate le problematiche relative alla connessione tra PSA e DSA; un'applicazione pilota, in termini di definizione di sequenza dell'incidente e relativa valutazione è indicativamente proposta come significativo caso di studio e come fase iniziale per l'implementazione di una metodologia appropriata per affrontare una delle principali questioni, così come emerge dall'incidente di Fukushima, cioè la valutazione dell'evento esterno.

In particolare, gli incidenti di perdita di alimentazione elettrica alla centrale (SBO) causati da eventi esterni come tifoni e tornado, vengono analizzati sia dal punto di vista deterministico che da quello probabilistico.

Il lavoro è stato svolto da ENEA con il contributo di CIRTEN (Università di Pisa). Per dettagli ed approfondimenti sull'attività si rimanda al rapporto Rds/2013/067.

b.3 Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi

L'aumento del grado di sicurezza dei reattori innovativi, come i reattori di quarta generazione, avviene attraverso l'implementazione di caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva nei rispettivi progetti. Una motivazione per l'uso di sistemi passivi per realizzare funzioni di sicurezza, come lo spegnimento del reattore e la rimozione del calore di decadimento, consiste in una maggiore affidabilità per i vantaggi dichiarati di semplicità, riduzione della necessità dell'intervento umano nonché della alimentazione elettrica esterna. Tuttavia recenti studi sollevano preoccupazioni e cautela circa la rivendicata superiorità dei sistemi passivi in termini di prestazioni e relativa disponibilità e affidabilità. Quindi, come risposta a questo problema, è stata effettuata una valutazione comparativa dei sistemi attivi e passivi in termini, principalmente, dei dati di performance e di affidabilità. A tale scopo la analisi a livello di sistema viene integrata con l'analisi a livello di sequenza incidentale, a seguito della forte interazione tra le prestazioni del sistema e lo scenario incidentale. Per il miglioramento della sicurezza e affidabilità diversi concetti sono presi in esame come il raffreddamento del nucleo con circolazione naturale in caso di station blackout e l'uso di sistemi passivi per lo spegnimento del reattore.

L'analisi evidenzia la rilevanza del valore dell'affidabilità come il più importante fattore nel processo di scelta tra le due alternative: la relativa valutazione è riconosciuta essere ancora un problema aperto, nonostante negli ultimi anni un importante sforzo sia stato fatto dalla comunità internazionale, sia per lo sviluppo che per la valutazione

dei sistemi di sicurezza passiva. L'inclusione di potenziali guasti e le stime di affidabilità dei sistemi passivi è pertanto raccomandato in studi probabilistici di valutazione di sicurezza.

In particolare, per quanto riguarda i sistemi a circolazione naturale, i risultati mostrano che la probabilità di guasto della funzione di sicurezza passiva non è da trascurare. Tuttavia con i modelli qui esaminati, le ipotesi semplificative e gli scenari limitati considerati, non è ragionevole stabilire che l'affidabilità funzionale per questi sistemi sia tale da impedire l'espletamento della funzione di sicurezza. Ma si può dedurre che attenzione deve essere posta agli aspetti funzionali del sistema passivo, (quelli non appartenenti all'hardware del sistema), che può mettere in discussione la loro superiore "accreditata" affidabilità rispetto a quelli attivi.

Sono stati inoltre analizzati i sistemi passivi di spegnimento del reattore con il loro potenziale di migliorare le prestazioni del sistema di protezione del reattore con l'aggiunta di un'ulteriore funzione di sicurezza, aumentando l'affidabilità dello "scram" e contribuendo in modo significativo alla affidabilità dell'impianto complessivo. Tuttavia anche in questo caso la mancanza di prove sperimentali e il loro stadio di sviluppo precoce non consente di verificare e validare il prefissato obiettivo di affidabilità, che li rende interessanti per la loro inclusione nel progetto dei reattori innovativi.

A tal proposito è stata effettuata un'analisi delle prestazioni dei sistemi di asportazione del calore, sia attivi che passivi, considerando le relative probabilità di fallimento degli stessi, in relazione alle sequenze funzionali che li caratterizzano. Suddette valutazioni sono state condotte utilizzando la metodologia basata sugli alberi dei guasti in cui si analizzano le possibili modalità di fallimento dei sistemi e/o componenti, che sono stati tenuti in considerazione sia per il funzionamento in modalità attiva, sia per il funzionamento in modalità passiva che in modalità mista. I risultati ottenuti attraverso questa analisi sono stati riportati all'interno del documento al fine di poter confrontare preliminarmente le prestazioni del sistema nelle diverse condizioni.

Alla fine si può concludere che l'affidabilità del sistema passivo non è meglio o peggio di quelli attivi: l'affidabilità dipenderà dal progetto complessivo e dal funzionamento del sistema, indipendentemente dal fatto che il sistema sia attivo o passivo. Un progetto di buon livello dell'impianto può comprendere sistemi attivi, passivi o una combinazione di entrambi i tipi di sistemi per soddisfare gli obiettivi di sicurezza e di prestazioni.

Anche se questi sistemi vengono accreditati di una maggiore affidabilità rispetto a quelli "tradizionali" - a causa della minore indisponibilità dovuta ad un guasto hardware - o perfino sono ritenuti "esenti" da guasti, essi pongono tuttavia alcuni problemi per quanto riguarda la valutazione delle relative prestazioni, in quanto esiste sempre un rischio non nullo del verificarsi di fenomeni fisici che portano a modi di guasto pertinenti

L'attività, svolta da ENEA in collaborazione con CIRTEN (Università di Roma "Sapienza"), è documentata e dettagliata nel rapporto RdS/2013/068.

c. Sperimentazione a supporto degli studi sulla sicurezza

L'obiettivo prevede attività sperimentali e di studi a supporto della qualifica di sistemi, strumentazione e componenti innovativi e della validazione della modellistica per l'analisi incidentale di reattori innovativi. Queste attività sono principalmente indirizzate al completamento dell'impianto integrale SPES3 in corso di realizzazione presso la SIET ed alla progettazione/realizzazione di campagne sperimentali in mock-up di componenti realizzati nel corso del precedente piano triennale.

c.1 Studi per il completamento della facility SPES3 presso la SIET

Gli strumenti di calcolo e le metodologie utilizzati per le verifiche di sicurezza nei reattori attuali e per supportare il progetto dei reattori innovativi richiedono di essere validati e qualificati a fronte di appropriate prove sperimentali. Queste prove devono riguardare sia specifiche fenomenologie (separate effect tests) che il comportamento integrale di sistema (integral tests). La facility SPES3 (simulatore integrale di SMR), parzialmente realizzata presso i laboratori SIET nel corso dei PAR precedenti permetterebbe, oltre alla valutazione dei principi di sicurezza intrinseca che sono alla base del "safety by design" dei reattori innovativi, la validazione-verifica (V&V) dei codici termoidraulici di sistema utilizzati per la simulazione di impianto dei reattori.

Con l'obiettivo di valutare la possibilità di completare la facility e le azioni che potrebbero essere realizzate a questo scopo nell'ambito del triennio 2012-2014, nel PAR 2012 sono stati effettuati diversi studi che hanno visto la partecipazione di ENEA, SIET e CIRTEN per definire un piano economico di completamento (SIET), per trovare partner disposti a contribuirvi (Politecnico di Milano) e per valutare l'utilizzo di componentistica preesistente (ENEA, Università di Palermo).

Valutazione dei costi di realizzazione della configurazione originale della facility

Negli ultimi anni, da parte delle istituzioni di ricerca e delle aziende italiane con il contributo del Ministero dello Sviluppo Economico, si è prodotto uno sforzo rilevante nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA che ha avuto un ampio riconoscimento internazionale. In particolare, è stato portato avanti il progetto e la costruzione della facility SPES3 (Figura 324) per lo studio e la dimostrazione delle caratteristiche di sicurezza e del comportamento dinamico dei più avanzati concetti di SMR attualmente in fase di sviluppo in diversi paesi. Va evidenziato che il completamento della costruzione e il funzionamento della facility offrirebbero una grande visibilità ad imprese italiane che fossero coinvolte e potrebbero offrire interessanti opportunità nel mercato internazionale degli SMR che si attende in sviluppo nei prossimi anni. Per queste ragioni si sono individuate una serie di imprese interessate a partecipare anche con contributi in-kind al completamento della facility: ATB Riva Calzoni SpA, Officine Resta e Morandini nella realizzazione, trasporto, assemblaggio ed installazione del canale di potenza; la SIET come general contracting del progetto.

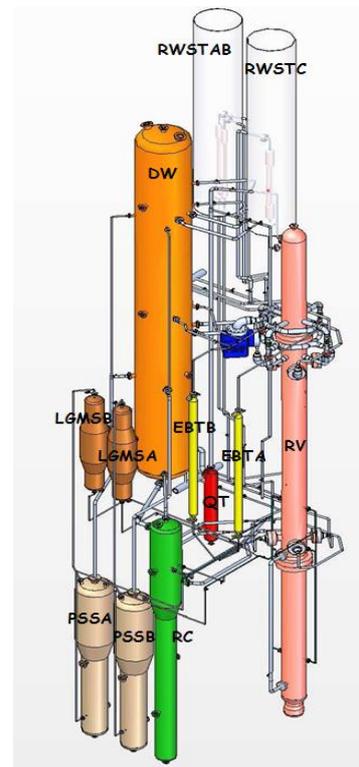
Progetto SPES-3 ha oggi raggiunto un grado di avanzamento molto importante essendo state completate le seguenti principali attività:

- progettazione di tutti i sistemi della facility;
- opere di predisposizione del sito;
- realizzazione della struttura portante dell'impianto e relativi sistemi accessori (ascensore, carro-ponte);
- costruzione ed installazione di tutti i componenti del sistema "contenimento"(Figura 324);
- costruzione ed installazione delle piscine e degli scambiatori di calore "Emergency Heat Removal System" (EHRS);
- costruzione ed installazione dell'Emergency Boration Tank (EBT);
- approvvigionamento ed installazione di componenti del sistema di alimentazione elettrica di potenza (interruttori 130 kV, trasformatore 130/3 kV, interruttori 3 kV);
- operazioni di manutenzione straordinaria sui due gruppi di potenza da 4 MW e 8 MW utilizzati come generatori di corrente continua per il riscaldamento delle barre del canale di potenza;
- approvvigionamento ed installazione di componenti del sistema di controllo (PLC);
- prove di qualificazione di prototipi di barre riscaldanti impiegate per la simulazione degli elementi di combustibile effettuate su impianto di prova realizzato ad hoc;
- prove di sviluppo di strumentazione speciale per la misura di parametri dei fluidi bi-fase.

Per il completamento della facility devono essere effettuate le seguenti principali attività:

- approvvigionamento del fascio di barre riscaldanti per la simulazione del nocciolo del reattore;
- realizzazione ed installazione del Canale Centrale inclusi i relativi internal ed, in particolare, i generatori di vapore elicoidali;
- approvvigionamento e montaggio delle pompe del circuito primario;
- approvvigionamento e montaggio del piping e delle valvole;
- approvvigionamento, installazione e cablaggio della strumentazione e del sistema di acquisizione/ elaborazione dati.

Dalla dettagliata valutazione economica delle attività e degli approvvigionamenti necessari per il completamento della facility sperimentale SPES3 effettuata è risultata una necessità di fondi di circa 8,5 M€, che è assolutamente incompatibile con il finanziamento previsto per il Progetto nel PT 2012-14. Anche un intervento parziale risulta difficilmente realizzabile poiché a questo stadio del progetto occorrerebbe l'approvvigionamento delle barre scaldanti il cui costo è stimato in circa 2,5 M€. Il coinvolgimento delle industrie nazionali ed un possibile contributo



DW Dry Well
EBT Emergency Boration Tank
LGMS Long Term Gravity Make-up System
PSS Pressure Suppression System
QT Quench Tank
RC Reactor Cavity
RWST Refuelling Water Storage Tank

Figura 324. Lay-out SPES3



Figura 325. Serbatoi del contenimento SPES-3 installati sulla struttura

in-kind della SIET porterebbero a ridurre il costo del completamento di circa 2,5 M€ senza sostanzialmente modificare i termini del problema.

I risultati del lavoro svolto da SIET con il contributo del Politecnico di Milano sono descritti nei rapporti Rds/2013/069 e 070.

Fattibilità di una diversa configurazione della facility SPES3

Gli studi effettuati da ENEA con il codice RELAP5 per dimostrare la fattibilità di una configurazione alternativa che utilizzi il canale di potenza e le pompe primarie della facility SPES2 hanno fornito risultati incoraggianti. Per accertare la rappresentatività della nuova configurazione nella valutazione di concetti per la sicurezza intrinseca come il forte accoppiamento tra circuito primario-contenimento e l'utilizzo di sistemi passivi, si sono simulati transitori incidentali già analizzati sulla configurazione originale della facility nei PAR precedenti.

In particolare l'analisi della mancanza di alimentazione elettrica (Station Black-Out) messo a confronto con lo stesso transitorio, simulato sulla configurazione originale tramite l'utilizzo del codice TRACE da parte dell'Università di Palermo in questa annualità del PAR e con il codice RELAP nei PAR precedenti, ha mostrato che la nuova configurazione sarebbe efficace nel verificare l'efficacia dell'EHRS fornendo risultati simili alla precedente analisi su SPES3. L'analisi di un incidente di rottura di 4" equivalenti sulla linea EBT ha invece mostrato sensibili differenze nell'accoppiamento tra primario e contenimento e nella fase di attivazione della circolazione naturale nel canale di potenza. Sono stati effettuati dei calcoli "di scopo" che hanno mostrato che queste differenze possono essere fortemente ridotte ripristinando il quantitativo originale di acqua nel primario e diminuendo le perdite di carico nel circuito per la circolazione naturale.

La fattibilità delle modifiche andrebbe comunque verificata con SIET che è il progettista della facility nella configurazione originale. L'utilizzo di canale di potenza e pompe già disponibile potrebbe portare al risparmio di buona parte dei circa 3 M€ valutati per il loro acquisto.

L'attività svolta da ENEA con il contributo dell'Università di Palermo è riportata nel rapporto Rds/2013/071.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Nelle precedenti annualità sono state realizzate infrastrutture sperimentali per lo studio di componenti critici nello sviluppo di reattori innovativi e per strumentazione prototipica necessaria per la facility sperimentale SPES3. Nel PAR 2012 l'indagine sperimentale è proseguita per ampliare la base di dati su cui validare i modelli analitici che in parallelo sono stati sviluppati.

Prove sperimentali e modello numerico dello spool piece con messa a punto e qualifica della strumentazione per la misura della portata bifase in SPES3

Le attività relative alla strumentazione speciale sono state dedicate allo sviluppo di una strumentazione affidabile per la misura della portata in condizioni bifase su impianti integrali, e nella fattispecie sulla facility SPES3. L'obiettivo della corrente annualità era la messa a punto di uno "Spool Piece", che integrasse alla sonda capacitiva (sonda ECP, Figura 326), sviluppata da SIET per la misura del grado di vuoto, gli strumenti necessari per ottenere la portata. A questa attività hanno contribuito sia SIET che CIRTEN (Politecnico di Torino) proponendo due diverse configurazioni dello "Spool Piece": la SIET integra la sonda capacitiva con un "drag disk" per la misura del flusso della quantità di moto ed un Vortex per misurare velocità media della miscela, il Politecnico di Torino propone l'utilizzo di due soli strumenti accoppiando un venturimetro alla sonda capacitiva. Per la messa a punto sono state effettuate campagne sperimentali e sviluppati modelli per l'interpretazione dei segnali elettrici per entrambi i dispositivi.

Per testare il dispositivo SIET sull'impianto realizzato presso i suoi laboratori si è dovuto integrare il drag disk con un Tubo di Pitot multiplo per la misura di valori del flusso della quantità di moto troppo bassi per la sensibilità del drag disk. Infatti, la potenza termica disponibile sull'impianto dell'ordine di alcune centinaia di kW non permetteva di erogare vapore a flussi comparabili a quelli della facility SPES3 per i quali il drag disk potrà essere utilizzato. L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti durante le prove, sono stati trattati in modo da calcolare la grandezza finale "portata massica bifase". Si è però evidenziato un consistente errore nella determinazione di questa portata dovuto all'elevata sensibilità del



Figura 326. Sonda ECP (SIET)

risultato finale rispetto alla valutazione del grado di vuoto. Pertanto l'incertezza su questo valore deve essere ridotta ulteriormente adottando accorgimenti migliorativi della sonda capacitiva.

Il Politecnico di Torino ha caratterizzato lo Spool Piece (SP) costituito da un Venturi e dalla sonda ECP, presso le proprie installazioni sperimentali su un condotto verticale interessato da una miscela aria-acqua in deflusso anulare e anulare disperso. In questo caso il grado di vuoto misurato dalla sonda viene utilizzato assieme a misure di pressione e temperatura per ricavare la portata massica bifase dalla caduta di pressione misurata nel venturimetro. Il modello numerico sviluppato ha consentito di calcolare la portata di aria e acqua con un errore massimo rispettivamente del 2 e del 30%. In questo modello la conoscenza della topologia del deflusso risulta essere fondamentale per l'interpretazione dei segnali. La conoscenza di grandezze locali consentirebbe di ridurre ulteriormente l'incertezza sui risultati, grazie alla possibilità di implementare all'interno del modello dello spool piece, correlazioni e modelli fluidodinamici sviluppati per specifiche topologie di deflusso.

Le attività CIRTEN e SIET sono descritte nei dettagli rispettivamente nei rapporti RdS/2013/072 e 073.

Validazione di codici e qualifica modelli per problematiche di miscelamento nel fondo vessel di reattori innovativi e di scambio termico in generatori di vapore innovativi

Gli studi sui componenti critici sono stati effettuati dal CIRTEN allo scopo di ampliare le matrici di prova e procedere alla qualifica di codici di calcolo e modelli numerici sulla base dei dati sperimentali disponibili. Le fenomenologie investigate hanno riguardato il miscelamento nel fondo vessel-downcomer (Università di Pisa) e lo scambio termico in generatori di vapore elicoidali (Politecnico di Milano).

L'Università di Pisa ha utilizzato le attrezzature realizzate nelle precedenti annualità dall'area sperimentale del Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione (mock-up del fondo vessel del reattore IRIS) per disporre di ulteriori dati, rivelatisi necessari nel corso degli studi precedenti, per lo studio dei fenomeni di miscelamento che avvengono a seguito di un incidente di piccola rottura (Small Break Loca of DVI line), e per la validazione di codici commerciali CFD (Computational Fluid Dynamics). A questo scopo sono stati effettuati 7 test con 3 diversi valori della portata di acqua fredda iniettata nel downcomer. In parallelo sono state condotte le analisi numeriche con il codice FLUENT il cui modello è stato affinato per una migliore descrizione del dominio geometrico e delle perdite di pressione concentrate. Dal confronto con i dati sperimentali risulta che FLUENT è in grado di riprodurre in modo ragionevole i fenomeni di miscelamento che avvengono nella regione downcomer-fondo vessel di un reattore PWR durante un transitorio in cui acqua fredda e borata viene iniettata nel vessel. Alcune differenze ancora presenti richiedono ulteriori investigazioni.

Il Politecnico di Milano ha investigato tre importanti problematiche connesse al flusso in tubi elicoidali. In primo luogo, per esaminare la transizione da flusso laminare a turbolento, si è intrapresa l'analisi dei profili sperimentali dei fattori di attrito per flusso liquido monofase in 13 geometrie diverse. La forte influenza del rapporto di curvatura è risultata evidente e sono state sviluppate correlazioni che permettono di predire l'inizio e la fine della zona di transizione. In secondo luogo, le perdite di pressione misurate per flusso bifase sono state analizzate per comprendere l'effetto della potenza scambiata sulla componente dovuta all'attrito delle perdite di pressione. Per il momento i risultati dell'analisi mostrano qualitativamente l'influenza della portata in questo fenomeno ma dai dati sperimentali disponibili non è possibile derivare nessuna conclusione qualitativa.

Per finire, uno studio con il codice CFD commerciale ANSYS FLUENT 14.0 è stato effettuato per il flusso bifase (acqua-vapore) in condizioni adiabatiche. Lo scopo era di verificare la capacità del codice di predire le perdite di pressione sperimentali. Si è trovato un buon accordo tra valori sperimentali e calcolati che ha permesso di dare credito ai profili di grado di vuoto calcolati. Di conseguenza è stata condotta anche un'analisi dell'attrito alla parete che ha prodotto una spiegazione fisica della presenza di un massimo nella curva della perdita di pressione per attrito in funzione della qualità del vapore.

Le attività svolte dall'Università di Pisa e dal Politecnico di Milano sono riportate nei rapporti RdS/2013/074 e 075.

LINEA PROGETTUALE 2: COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE

Nell'ambito delle attività per il nucleare di IV generazione le attività si sono focalizzate sulla tecnologia dei reattori a piombo a causa dell'interesse e della competenze espresse dall'industria Italiana e in virtù della rilevanza internazionale del parco di apparecchiature sperimentali presenti in ENEA: reattore TAPIRO per dati nucleari, impianti CIRCE, NACIE e HELENA per termoidraulica e qualifica componenti, e impianti per prove materiali in piombo.

Si sono dunque supportate nell'ambito del progetto le attività di ricerca e sviluppo finalizzate alla costruzione del reattore dimostrativo a piombo, di concezione ENEA-ANSALDO, denominato ALFRED.

A tale scopo si è lavorato su tre aree di intervento, tutte afferenti allo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR refrigerati a piombo, che rappresentano altrettanti ambiti di criticità per ALFRED.

a. Progettazione di Sistema e Analisi di Sicurezza

a.1 Progettazione di sistema

Nell'ambito dell'attività si sono realizzati studi orientati alla valutazione dello stato dell'arte e delle prospettive di sviluppo dei principali reattori della IV Generazione, con particolare riferimento alla sostenibilità dei sistemi LFR e SMR veloci refrigerati a piombo.

Si è dunque valutata la sostenibilità della filiera di IV generazione LFR, nell'ambito di uno scenario energetico sviluppato in una serie di Paesi dell'Europa del sud-est, allargando l'analisi all'Ucraina, includendo l'Italia e ipotizzando, per questa, un ritorno al nucleare con la realizzazione di nuovi impianti a partire dalla III generazione avanzata e LFR.

E' stata calcolata, assumendo ipotesi conservative, l'evoluzione del fabbisogno elettrico per tutti i paesi oggetto dell'analisi e da questa è stato dedotto l'andamento della potenza nucleare installata assegnando una percentuale di contributo in linea con le medie attuali.

Sono stati analizzati tre diversi scenari: il primo non prevede la presenza dei LFR, gli altri due invece considerano la introduzione dei LFR. In un caso si sono considerati paesi che portano avanti politiche nucleari isolate senza alcuna forma di cooperazione nella gestione del ciclo del combustibile a monte e a valle di esso; nell'altro caso infine tutti i paesi coordinano le loro politiche nucleari per la gestione del combustibile.

Per queste tre situazioni sono stati determinati i flussi di materiale (fabbisogno di uranio naturale, SWU per l'arricchimento, accumulo di Pu e attinidi minori) e i mix dei reattori (PHWR, LWR e LFR) determinati secondo criteri di ottimizzazione e calcolati con il codice MESSAGE della IAEA.

I risultati ottenuti confermano i benefici sulla sostenibilità del sistema nucleare regionale in termini di diminuzione del consumo di Uranio naturale e in termini di eliminazione dello stock di Pu prodotto dai reattori ad acqua.

Nell'ambito dell'attività si è proceduto inoltre all'implementazione di attività di studio e installazione di componenti e strumentazione sul reattore veloce TAPIRO, per il suo utilizzo in ambito europeo ed internazionale come reattore di ricerca in supporto ai sistemi LFR.

Sul reattore TAPIRO, il cui spettro neutronico si avvicina molto a quello di un reattore di IV generazione, si sono avviate prove di irraggiamento (a bassi dpa) su campioni di materiali strutturali ricoperti con coating prototipici. Obiettivo del lavoro è stato quello di far ripartire il reattore in una lunga campagna di irraggiamento materiali recuperando un minimo di efficienza del sistema, rivedendo le procedure e integrando la strumentazione necessaria allo scopo. Ad oggi il reattore è pienamente funzionante, gli irraggiamenti effettuati e le sue modalità di funzionamento riviste alla luce degli impegni futuri che la macchina andrà ad affrontare.

I risultati del lavoro svolto da ENEA in collaborazione con l'Università di Roma "Sapienza" sono riportati nei rapporti RdS/2013/015 e 016.

a.2 Progettazione nocciolo LFR

Nell'ambito dell'obiettivo si sono implementati studi sull'analisi di incertezze e rappresentatività di esperienze a potenza zero a supporto di sistemi critici e sottocritici (ADS) raffreddati a piombo, mediante l'applicazione della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) al caso della esperienza a potenza zero GUINEVERE con nocciolo caricato con combustibile metallico.

Il programma GUINEVERE è stato concepito e strutturato in modo da fornire un supporto completo al progetto MYRRHA. L'esperienza, realizzata utilizzando una versione modificata del layout dell'impianto critico VENUS situato presso il Centro SCK-CEN di Mol (Belgio), consente analisi neutroniche approfondite in condizioni sia critiche che sottocritiche di noccioli con combustibile metallico in matrice di piombo. In Figura 327 sono riportati i layout delle facility GUINEVERE e di MYRRHA.

Un importante problema relativo alle quantità integrali misurate su GUINEVERE è la loro rappresentatività rispetto al sistema di riferimento MYRRHA, rappresentatività che deve comprendere (per quanto possibile) le proprietà neutroniche più importanti del sistema di riferimento, sia per il normale funzionamento che per gli aspetti di sicurezza. L'operazione in funzionamento normale in condizioni sottocritiche include, per esempio, il monitoraggio on-line della reattività. Un notevole sforzo in questo campo viene attualmente fatto a livello internazionale al fine di identificare tecniche adeguatamente affidabili ed accurate. Oltre alla valutazione dei diversi parametri cinetici in gioco, è di fondamentale importanza una caratterizzazione affidabile dello spettro energetico del flusso

neutronico presente nel nocciolo dei due sistemi GUINEVERE e MYRRHA. In questo quadro il problema della rappresentatività, rispetto al sistema MYRRHA, di indici spettrali sperimentali opportunamente selezionati misurati in GUINEVERE è fondamentale, soprattutto tenendo conto della particolare struttura della distribuzione energetica del campo neutronico associato alla composizione MOX/piombo-bismuto presente in MYRRHA.

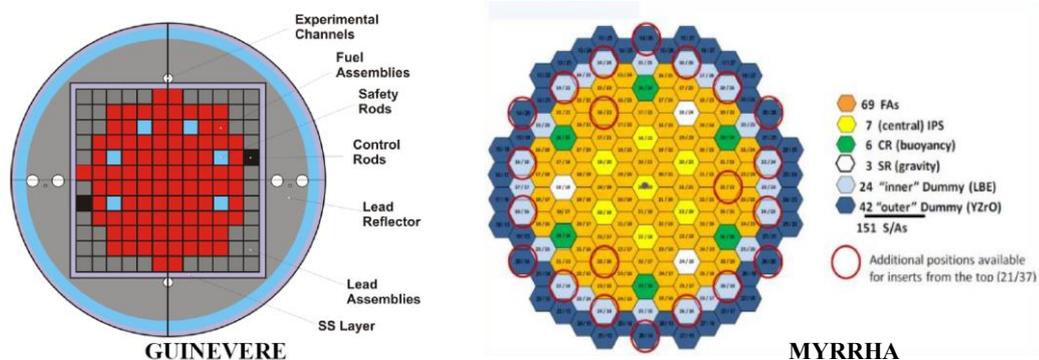


Figura 327. Layout facility GUINEVERE and MYRRHA¹⁹

Al fine di dare un contributo preliminare in questo campo, ci si è concentrati sull'analisi, attraverso simulazioni numeriche, della rappresentatività, rispetto alle analoghe quantità del sistema di riferimento MYRRHA, di alcune grandezze integrali relative alla facility GUINEVERE. L'analisi è stata effettuata per mezzo di diversi percorsi di calcolo GPT implementati nel codice neutronico ERANOS (European Reactor ANalysis Optimized System). In particolare, l'analisi è stata focalizzata sul comportamento degli indici spettrali fissioni Pu-239 / fissioni U-235, fissioni U-238 / fissioni U-235 e fissioni NP-237 / fissioni U-235 a seguito di una riduzione del 20%, localizzata o globale, della densità del piombo (GUINEVERE) o del piombo-bismuto (MYRRHA). I calcoli sono stati eseguiti modellando i due sistemi secondo geometrie 2D cilindriche (le sole geometrie che attualmente consentono il pieno utilizzo, nel codice ERANOS, della modalità GPT). Per ottenere i coefficienti di correlazione è stata usata la matrice di dispersione Bolna a 15 gruppi energetici.

L'analisi ha fornito risultati incoraggianti, con valori dei coefficienti di correlazione elevati per tutti gli indici spettrali presi in considerazione, con particolare attenzione per quelli ad alta energia. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/017.

Relativamente agli studi di dinamica sui sistemi LFR e SMR, il lavoro svolto consiste nello sviluppo di procedure per la generazione di una libreria dinamica di dati nucleari di base (sezioni d'urto) in funzione della temperatura, in vista del successivo accoppiamento della libreria medesima con la fase di calcolo dei transienti in sistemi LFR/ADS (e ADS SMR refrigerati a piombo).

Tali attività si affiancano alle attività previste dal progetto europeo di ricerca LEADER (Lead European Advanced DEMonstrator Reactor), cofinanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro EURATOM, per lo sviluppo del progetto del reattore ALFRED (Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator).

Si sono determinate sezioni d'urto efficaci rappresentative delle diverse regioni necessarie alla modellazione del nocciolo di ALFRED a partire dalle librerie elementari di dati nucleari JEFF-3.1, e si è prodotto un set di sezioni d'urto, valutate a diverse temperature rappresentative delle condizioni di funzionamento nominale ed incidentali, per un loro successivo utilizzo in codici di dinamica tridimensionale di nocciolo.

La produzione delle librerie necessarie avviene per condensazione di dataset di base, definiti su una mesh energetica "fine" a 1968 gruppi, fino ad un livello di descrizione energetica più lasco (5 gruppi) ma ugualmente rappresentativo, mediante tecniche di valutazione dei fenomeni di autoschermo spaziale ed energetico (risonanze) e conservazione dei tassi di reazione. La valutazione delle librerie di sezioni d'urto efficaci è stata effettuata per le regioni rappresentative del nocciolo, ovvero le zone attive degli elementi di combustibile in zona interna ed esterna (caratterizzati da diversi tenori di plutonio nel combustibile), le barre di controllo e di sicurezza, i riflettori assiali e radiale, le regioni di testa e piede degli elementi e il piombo presente nelle regioni circostanti il nocciolo.

¹⁹ H. A. Abderrahim, "ADS, What's that? and what for? MYRRHA: an International Large Research Infrastructure and a unique worldwide Irradiation Facility and P&T tool", NOMAGE 4, Nordic Nuclear Materials Forum for Generation IV Reactors, Halden, Norway, 2011

La valutazione delle sezioni d'urto efficaci a partire dai dati grezzi e sulle geometrie rappresentative di tali regioni è stata effettuata per mezzo del modulo ECCO (European Cell COde) incluso nel formulario per l'analisi neutronica di reattori veloci con metodi deterministici. Il calcolo di tali sezioni d'urto è stato effettuato parametrizzando le temperature di combustibile (per le sole zone attive degli elementi di combustibile) e di refrigerante (per tutte le regioni).

Le sezioni d'urto così ricavate sono state quindi verificate riproducendo calcoli di nocciolo basati su tali dati di ingresso, per mezzo di un altro modulo di ERANOS, VARIANT (un modulo variazionale-nodale per a soluzione dell'equazione del trasporto diretta ed aggiunta in geometrie tridimensionali). In aggiunta, una seconda verifica, indiretta, è stata effettuata confrontando le sezioni d'urto ricavate per mezzo della procedura descritta in precedenza con altri valori, ricavati - nelle medesime condizioni - per mezzo del codice statistico SERPENT.

I risultati delle verifiche mostrano una buona consistenza tra i dati ricavati e quelli assunti a riferimento nel progetto del nocciolo di ALFRED, all'interno del progetto LEADER. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/018.

Relativamente alla concettualizzazione del DEMO-LFR, scopo del lavoro è la descrizione dei metodi e dei risultati della progettazione neutronica e della preliminare verifica termoidraulica del nocciolo di AFRODITE (Advanced Fast Reactor Oriented to the Demonstration of the Innovative lead Technology), ad integrazione e completamento delle attività iniziate nella precedente annualità. Dopo un accurato lavoro di ricerca della configurazione ottimale, il nocciolo, composto da 73 elementi di combustibile, raggiunge la desiderata configurazione critica e con un eccellente appiattimento della distribuzione di potenza - sotto l'ipotesi di un periodo di irraggiamento in pila di 5 anni ed una strategia di ricarica di un quinto di nocciolo ogni anno - qualora i 33 elementi della regione centrale siano caricati con un combustibile arricchito (in termini di contenuto di plutonio e americio 241) al 18,9 % vol ed i rimanenti 40 siano invece caricati con un combustibile più arricchito (23,6 % vol). Tale configurazione esibisce, nell'anno che intercorre tra due ricariche successive, un'escursione di reattività di -1918 pcm. Per la compensazione di questa reattività ed il controllo e la gestione in sicurezza del sistema, sono stati dimensionati e posizionati due sistemi di barre assorbenti le cui efficacia, in termini di riserva di antireattività, sono state stimate pari a 4700 pcm per il sistema di regolazione e controllo (costituito da 17 assorbitori a dito posizionati in prossimità degli elementi più caldi) e 5550 per quello di sicurezza (costituito da 14 assorbitori a dito posizionati uniformemente in parte delle rimanenti posizioni). È utile sottolineare che l'uso simultaneo di tutti e 17 gli assorbitori nelle operazioni di regolazione e controllo del nocciolo consente di aggiustare in modo estremamente puntuale la distribuzione di potenza durante il ciclo, evitando così macchie calde incontrollabili, e limita notevolmente la massima reattività inseribile nel nocciolo per estrazione accidentale di una barra.

Al termine dei 5 anni di irraggiamento in nocciolo, nell'elemento medio - il cui inventario iniziale di attinidi è di circa 100 kg ripartiti tra uranio (78,1 kg), plutonio (21,7 kg) ed americio 241 (0,29 kg) - circa 7,52 kg di nuclei pesanti vengono fissionati generando altrettanti nuclei leggeri. Il bilancio puntuale per elemento permette di apprezzare come circa 6 kg di uranio siano (principalmente) trasmutati in plutonio, il quale, ciononostante, diminuisce di circa 1,82 kg. Simultaneamente vengono formati (al netto delle concorrenti trasmutazioni e fissioni) 32 g di nettunio, 256 g di americio (che si sommano ai circa 290 g preesistenti) e 45 g di curio. Il bilancio netto di attinidi fissionati nei 5 anni di irraggiamento corrisponde ad un bruciamento medio del combustibile pari a circa 75 MWd/kg_{HM}, mentre il valore di picco sfiora i 105 MWd/kg_{HM}.

Nonostante gli eccellenti risultati ottenuti sull'appiattimento di potenza, a causa di un errore di sottostima in fase di progetto (eccesso di confidenza nella possibilità di ottenere un appiattimento della distribuzione della potenza estremamente spinto), il valore massimo della potenza lineare è risultato superiore rispetto a quanto atteso (circa 357 W/cm contro 348 W/cm). Di conseguenza, i risultati delle successive verifiche termoidrauliche hanno mostrato come anche i valori relativi alla massima temperatura di guaina e di combustibile eccedano i limiti assunti (536,4 °C per la guaina e circa 2080 °C per il combustibile contro 525 °C e 2000 °C, rispettivamente) anche se, per l'ampiezza dei margini presi in considerazione, nessuno di tali valori, di per sé, desta preoccupazione, tutti restando al di sotto dei limiti fisici di sicurezza (550 °C e circa 2800 °C, nel solito ordine). L'effetto netto di riduzione dei margini richiede un'accurata analisi di sicurezza (sia con codici best estimate per analisi di sicurezza, sia con codici che consentano la propagazione delle incertezze) per sondare l'effettiva robustezza del sistema.

I risultati del lavoro svolto sono descritti nel rapporto RdS/2013/020.

Si è poi proceduto alla ulteriore validazione del codice FRENETIC. Nelle precedenti annualità erano state gettate le basi per lo sviluppo di uno strumento di analisi dinamica di nocciolo, costituito dall'accoppiamento di due moduli sviluppati ad-hoc per l'analisi neutronica e termoidraulica di un reattore veloce refrigerato a piombo liquido, con una configurazione geometrica degli elementi di combustibile così detta "chiusa-esagonale".

Il modulo di analisi neutronica, inizialmente concepito come zero-dimensionale, è stato recentemente esteso per una soluzione pienamente tridimensionale e dipendente del tempo dell'equazione della diffusione dei neutroni a più gruppi energetici.

Il modulo termoidraulico, invece, si basa su un approccio cosiddetto quasi-3D: le equazioni di conservazione della massa, del momento e dell'energia per il refrigerante sono risolte esplicitamente nella sola direzione assiale degli assemblaggi, insieme all'equazione di conduzione del calore nelle barrette; nelle due direzioni trasversali, invece, sono implementati modelli di accoppiamento termico tra elementi adiacenti a quote prestabilite.

Il modulo termoidraulico, già validato nelle precedenti annualità dell'AdP relativamente al caso di un singolo elemento, per confronto con i dati sperimentali ricavati dalle esperienze condotte presso il centro ENEA del Brasimone sull'impianto CIRCE, è stato ulteriormente testato nel caso di più elementi. A causa dell'indisponibilità di dati sperimentali relativi a prove condotte su strutture a più elementi in ambiente di piombo liquido, si è deciso di procedere alla validazione per confronto con i risultati di simulazioni eseguite per mezzo del già validato codice di sistema RELAP5-3D[®] nell'ambito di un esercizio di benchmark internazionale condotto sui dati delle prove di fine vita eseguite sul reattore americano EBR-II, refrigerato a sodio.

Con riferimento ad una geometria semplificata del nocciolo di EBR-II, sono state prese in considerazione due condizioni incidentali di tipico interesse per le future applicazioni del codice FRENETIC: la completa perdita di circolazione forzata del refrigerante attraverso il nocciolo (complete loss of flow) e il grippaggio di una delle pompe primarie del reattore. Tali scenari sono stati selezionati, tra i molti possibili, per le condizioni di forte disuniformità di flusso implicate nel nocciolo: nel primo caso, una quasi omogeneizzazione delle portate attraverso elementi con forti differenze di generazione di potenza; nel secondo caso, una combinazione di asimmetrie di flusso e generazione di potenza.

I risultati delle analisi mostrano un accordo incoraggiante tra FRENETIC e RELAP5-3D[®], suggerendo la possibilità di utilizzare efficacemente il codice FRENETIC per analisi dinamiche tridimensionali di nocciolo. Ciononostante, anche alla luce di alcune discrepanze sulle proprietà termiche del refrigerante e sulla modellazione del refrigerante interstiziale tra gli elementi di combustibile, assunte dai due codici, che mascherano l'effettiva possibilità di accordo, ulteriori approfondimenti sono richiesti per ultimare la validazione del modulo termoidraulico del codice in esame. I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/021.

a.3 Analisi di sicurezza

Nell'ambito del progetto si sono avviate attività di supporto alla progettazione del combustibile nucleare. Relativamente agli studi analitici su combustibili per reattori veloci refrigerati a metallo liquido, il lavoro svolto ha inteso offrire un contributo alla modellazione dei fenomeni accoppiati di rigonfiamento gassoso e rilascio di gas di fissione in combustibili nucleari a base di ossidi, con applicazione all'analisi termo-meccanica integrale (e, in definitiva, alla progettazione e al licensing) delle barrette di combustibile. Il lavoro ha visto lo sviluppo di un nuovo modello integrato per i suddetti fenomeni, fondato su un approccio ingegneristico orientato al compromesso pratico tra una descrizione fisica e i requisiti computazionali inerenti all'analisi integrale di barretta. Il modello è stato implementato con successo nel codice di performance TRANSURANUS e validato tramite confronto dei risultati con un ampio database sperimentale. Il modello è stato sviluppato su base fisica, al fine di garantirne l'applicabilità generale ai combustibili ossidi – sia biossido di uranio (UO₂), impiegato nei reattori nucleari ad acqua leggera, sia ossidi misti di uranio e plutonio (MOX). In considerazione della vasta disponibilità di dati sperimentali, questa prima fase di validazione ha previsto la simulazione di prove di irraggiamento in reattore di barrette di combustibile UO₂, appartenenti all'International Fuel Performance Experiments (IFPE) Database dell'OECD/NEA. I risultati indicano una riproduzione conforme dei meccanismi fisici, un buon accordo con i dati sperimentali e significativi miglioramenti del codice TRANSURANUS. Rispetto ai trattamenti empirici comunemente adottati nei codici di performance, i principali aspetti innovativi del presente lavoro risiedono: (i) nella base fisica del nuovo modello, (ii) nell'accoppiamento tra il rigonfiamento gassoso e il rilascio di gas di fissione e (iii) nella descrizione della dipendenza dei fenomeni dallo stato di sforzo del combustibile. Quest'ultimo aspetto, essenziale in condizioni di interazione meccanica guaina-combustibile, è di rilevanza nell'ottica dell'estensione dei margini operativi e del bruciamento (burn-up) del combustibile nucleare, tendenza attuale a livello industriale.

Inoltre, è stata condotta una revisione critica degli approcci attualmente adottati in letteratura e nei codici di performance per la modellazione del rilascio dei gas di fissione e dell'elio in combustibili MOX, focalizzandosi in particolare sulle problematiche dovute al rilascio di elio. Quest'ultimo, infatti, può influenzare in maniera significativa la performance del combustibile in reattore, così come il suo comportamento in condizioni di stoccaggio a lungo termine. Durante l'irraggiamento, l'elio intrappolato nelle pastiglie di combustibile può contribuire a degradarne le proprietà; d'altro canto, la frazione di elio rilasciata nel volume libero della barretta influenza la pressione interna con conseguenze sulla sicurezza. Tali aspetti sono particolarmente importanti per i

combustibili MOX, il cui impiego è previsto per una migliore sostenibilità dell'energia nucleare (chiusura del ciclo del combustibile) e per la gestione del plutonio di origine militare. La produzione di elio aumenta esponenzialmente con il burn-up ed è particolarmente significativa per i MOX, in quanto il plutonio inizialmente presente comporta una maggiore produzione di emettitori α . Con riferimento a tali problematiche, nel presente lavoro sono stati sviluppati, accoppiati e implementati nel codice TRANSURANUS modelli di rilascio dei gas di fissione e di elio rilevanti per la performance di combustibile del tipo UO_2 e MOX ad elevato burn-up.

In prospettiva, è prevista una verifica più esaustiva dei modelli suddetti, sia in termini di confronto con dati sperimentali d'irraggiamento, sia in termini di valutazione delle caratteristiche di convergenza e stabilità numerica dei calcoli di performance in condizioni di interazione meccanica guaina-combustibile. Inoltre, l'integrazione di ulteriori dettagli fisici (quali i meccanismi di rilascio a-termico, gli effetti di burst release, oppure quelli connessi con l'high burn-up structure) può rappresentare un'interessante linea di sviluppo del lavoro fin qui condotto, finalizzata a migliorare le capacità predittive del codice TRANSURANUS e per estendere il campo di applicazione dei modelli messi a punto in questo lavoro.

I risultati dell'attività svolta sono descritti nel rapporto RdS/2013/022.

Nell'ambito del lavoro si è inoltre provveduto alla validazione del codice TRANSURANUS versione 2012 nel simulare il comportamento di combustibili tipo MOX assoggettato sia a "normal conditions" che "power ramps" (rapporto RdS/2013/023). Particolare enfasi è data alle principali variabili che influenzano il fenomeno del "Fission Gas Release (FGR)

Due database sperimentali nel range di "burn-up" 25-30 MWd/kgHM sono stati selezionati, modellati e analizzati: l'esperimento PRIMO (1 barretta) e l'esperimento IFA-597 (2 barrette). Questi databases sono stati rilasciati a scopo "benchmarking" e appartengono al database pubblico "International Fuel Pin performance Experimental database (IFPE)". Tale banca dati è stata creata ed è mantenuta da OECD/NEA appositamente per raccogliere dati necessari allo sviluppo e validazione di codici principalmente di tipo "fuel pin mechanics" (es. TRANSURANUS).

In futuro, esperimenti sul combustibile MOX irraggiato ad elevato burn-up potrebbero essere selezionati, acquisiti e modellati allo scopo di espandere il dominio di validazione analizzato (attualmente, al termine dell'attività esso è basato su tre barrette).

Analogamente si è verificata la capacità del codice TRANSURANUS versione 2012 nel predire il comportamento del combustibile tipo MOX sviluppato appositamente per reattori tipo "Fast Breeder (a sodio)" in condizioni di tipo DBA (Design Basis Accident). Particolare enfasi è data alle principali variabili che influenzano la simulazione del profilo di temperature nel combustibile ed i fenomeni ad esso connessi durante le escursioni di potenza fino al principio di fusione sulla base dell'esperimento HEDL-P-19. Detto test è stato condotto nel reattore veloce EBR-II (USA) al fine di investigare l'effetto della larghezza del gap iniziale tra pellets e camicia, da 0,086 a 0,25 mm, sulla potenza lineare richiesta per causare principio di fusione al centro di un combustibile MOX a inizio vita. Il database include 16 FBR barrette MOX fresche incamiciate con camicia in acciaio INOX tipo 316 (lavorato a freddo al 20%).

Il database analizzato in questo anno include una larga quantità di dati non ancora processati che potrebbero essere utilizzati per valutare il comportamento dei modelli di predizione del "central void" e dell'estensione radiale della grana colonnare. In aggiunta il test HEDL-P-20 dovrebbe essere simulato e analizzato in virtù del fatto di essere stato condotto come "twin test" di HEDL-P-19. Esso include infatti dati similari su altrettante 16 barrette MOX testate dopo irraggiamento nell'EBR-II sino ad un burn-up di 10 MWd/kgHM. Infine, per quanto concerne il "modeling" (TRANSURANUS versione 2012), l'attività sembrerebbe indicare la necessità di raffinare alcuni modelli (es.: conducibilità del MOX oltre 2500°C, criterio di inializzazione della fusione etc...).

I risultati di questa attività sono descritti nel rapporto RdS/2013/024.

Relativamente al contributo prodotto nello sviluppo e alla qualifica di codici e metodi per l'analisi di sicurezza di reattori di IV generazione refrigerati a metalli liquidi, il lavoro si divide in due parti.

Una prima parte (A) nella quale sono presentati lo sviluppo di due modelli RELAP5-3D di reattori veloci a piscina refrigerati a metallo liquido: 1) CP-ESFR ed 2) EBR-II. La prima nodalizzazione relativamente semplice e fast running sarà portata a termine attraverso l'uso dei dati neutronici d'impianti calcolati nell'ambito dello stesso lavoro. La seconda nodalizzazione, molto dettagliata e complessa, fa uso di componenti tridimensionali e sarà utilizzata nell'ambito del progetto IAEA Coordinated Research Project (CRP) on EBR-II Shutdown Heat Removal Tests (SHRT). Il rapporto descrive l'ambito, le nodalizzazioni, la strategia e i principali step della qualifica.

La seconda parte (B) riguarda uno studio sull'applicabilità degli attuali codici termoidraulici di sistema per l'analisi di sicurezza di reattori di IV generazione refrigerati a metalli liquidi (piombo e sodio). Tale attività segue il seguente schema logico. 1) Identificazione dei fenomeni termoidraulici rilevanti per la sicurezza prendendo a

riferimento il progetto prototipico di un reattore refrigerato a metallo liquido (es. ELSY o ALFRED). 2) L'identificazione dei principali modelli e correlazioni rilevanti per la simulazione del codice. 3) La valutazione di tali modelli e correlazioni. 4) L'identificazione dei possibili miglioramenti che possono essere implementati e di quali modelli aggiuntivi sarebbero necessari.

L'attività di sviluppo dei modelli RELAP5 degli impianti nucleari CP-ESFR ed EBR-II nell'ambito del PAR-2012 è stata completata. In futuro, le nodalizzazioni dovranno completare il processo di qualifica ed essere utilizzate per il calcolo di transitori. In particolare, il CP-ESFR sarà utilizzato per il calcolo dei parametri di sicurezza del nocciolo del reattore quando caricato con combustibile a "pellet" o "sherpac". La nodalizzazione dell'EBR-II sarà utilizzata per eseguire calcoli blind e di post test basati su dati sperimentali di due transitori messi a disposizione da IAEA. In quest'ultimo caso sarà valutata la possibilità di compiere calcoli dove il modello termoidraulico 3D è accoppiato con un codice di neutronica 3D adatto alla simulazione di reattori veloci.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/025.

Relativamente alla determinazione dei parametri di sicurezza del core e dell'andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido, attività che ha riguardato lo sviluppo e la validazione di un modello Monte Carlo basato sul codice MCNPX v.2.7 per la simulazione neutronica di un reattore veloce raffreddato a sodio. Tale modello è stato sviluppato seguendo le specifiche dell'OECD/NEA Sodium Task Force. I principali parametri nucleari (coefficienti di reattività, parametri nucleari, distribuzione tridimensionale della potenza e concentrazione degli attinidi) del core, sono stati calcolati per un nocciolo all'equilibrio, ad inizio e fine del ciclo. I risultati ottenuti sono stati sottomessi all'OECD/NEA ed il confronto preliminare con altre soluzioni indipendenti dimostra il buon accordo dei dati calcolati. I risultati di questo lavoro e la metodologia applicata saranno utilizzati nell'ambito degli sviluppi di modelli termoidraulici di un SFR ed EBR-II (rapporto RdS/2013/025) utilizzando il codice RELAP5-3D[®]. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/026.

Con riferimento agli studi di flow blockage sui sistemi LFR, è stata realizzata un'analisi numerica attraverso la fluidodinamica computazionale (CFD). L'elemento esagonale chiuso del progetto di dimostratore LFR ALFRED è stato preso in esame per lo studio. Il modello CFD presenta un elevato livello di dettaglio ed include le diverse regioni del FA (Fuel Assembly): ingresso, zona attiva, follower, FA plenum. La conduzione nella clad e nel wrap è stata modellata attraverso la presenza di strutture solide, e si è tenuto conto della portata di bypass e della potenza volumetrica depositata dai gamma. Sono state modellate tutte le pin del FA senza particolari piani di simmetria. Ciò ha consentito di studiare situazioni di blockage non-simmetrico, nonché di tener conto correttamente dei flussi trasversali di massa, quantità di moto ed energia tra tutti i sottocanali del FA.

Come era prevedibile da un'analisi a priori riportata nella parte introduttiva ed in precedenti lavori, possono essere distinti due effetti principali: un effetto locale nella regione di ricircolazione a valle del bloccaggio con stagnazione e massimo di temperatura, ed un effetto integrale dovuto alla diminuzione di portata nei sottocanali bloccati, con aumento del gradiente di temperatura assiale ed innalzamento della temperatura di guaina alla fine della zona attiva. I risultati indicano che l'effetto integrale domina ai bassi gradi di bloccaggio (<10% in frazione di area) mentre l'effetto locale domina agli alti gradi di bloccaggio (>20%). E' da sottolineare che i codici di sistema per loro natura non descrivono il fenomeno di ricircolo locale e simulano l'effetto integrale di portata ridistribuito su tutti i sottocanali.

L'area di bloccaggio è stata posta all'inizio della zona attiva, così che i due fenomeni sovramenzionati possano aver luogo pienamente. La portata di massa ai differenti gradi di bloccaggio è stata imposta sulla base di calcoli a latere con codici di sistema.

Sono state condotte sia simulazioni stazionarie che transitorie ed i risultati indicano che un bloccaggio del 30% determina un massimo di temperatura sulla guaina a valle della zona bloccata di circa 1000 °C e questa condizione è raggiunta in un tempo caratteristico di 2-3 s senza overshoot. Le simulazioni indicano anche che bloccaggi >15% possono essere individuati inserendo termocoppie nella zona di plenum.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/027.

Per quanto concerne lo studio di scenari con parziale congelamento del sistema primario dell'LFR, viene presentato un metodo numerico di fluidodinamica computazionale (CFD) di trasporto convettivo e scambio termico durante la solidificazione di un metallo liquido pesante (Piombo o Piombo-Bismuto LBE) applicabile a qualsivoglia geometria. Il metodo permette di mantenere formalmente un approccio mono-fase di bypassare la complessità computazionale e modellistica di un bifase pieno. Il metodo consiste nell'introduzione di termini sorgente di quantità di moto che dipendono dalla velocità locale e calori specifici che dipendono dalla temperatura nel range di solidificazione. La consistenza fisica globale del metodo è garantita dal fatto che il calore

latente di solidificazione è correttamente tenuto in conto nella formulazione. Nelle regioni pienamente solidificate, le velocità sono prossime a zero ed il trasporto di calore è governato dalla pura conduzione. Durante la solidificazione della massecola elementare, la frazione solida è tra 0 ed 1, ed i termini convettivi risultano attenuati progressivamente secondo la specifica forma della sorgente di quantità di moto.

Il metodo è stato applicato con successo ad un componente reale, cioè allo scambiatore di calore della facility NACIE-UP del C.R. ENEA Brasimone. Sono state ipotizzate condizioni di parziale congelamento dello scambiatore dovute alla accidentale introduzione di acqua fredda a temperatura ambiente nel lato secondario. Il metodo ha fornito risultati a piena convergenza in tutti i casi della matrice di prova, include lo scambio termico coniugato nelle strutture termiche dello scambiatore ed altri effetti fisici normalmente modellati dalla CFD. La fattibilità, robustezza del metodo è stata provata ed il congelamento del LBE è stato ottenuto nella simulazione CFD nelle regioni dove tale fenomeno era atteso. Il metodo ha dato prova di poter garantire numericamente una transizione dolce tra metallo liquido e metallo solido nei campi di moto.

Il prossimo passo verso la piena convalida del metodo verrà dal confronto con dati sperimentali e modelli numerici bifase liquido/solido pieni. Dopo tale verifica, il metodo potrà essere applicato a sistemi più complessi. A tale scopo una facility sperimentale chiamata SOLIDX verrà progettata, costruita e strumentata al C.R. ENEA Brasimone. Il design concettuale della facility è ad un buono stato di avanzamento, ed il dominio di investigazione sarà una cavità piena di LBE in circolazione naturale. Lo spessore del piombo solido verrà misurato con tecniche acustiche e confrontato con i risultati numerici del modello.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/028.

Nell'ambito del lavoro si è inoltre realizzata un'analisi critica della strumentazione e dei sistemi di controllo di reattori al piombo già sviluppati o attualmente in fase di progettazione e sviluppo a livello internazionale. In particolare, al fine di integrare le non numerose informazioni a disposizione a causa del limitato numero di progetti in corso o alla confidenzialità dei dati per quelli in fase di sviluppo, ci si è avvalsi del supporto di simulazioni Montecarlo per evidenziare le principali caratteristiche e possibili problematiche della strumentazione di nocciolo.

Lo studio rappresenta un passo preliminare ma ineludibile per lo sviluppo dei sistemi di strumentazione e controllo per reattori al piombo liquido. Sulla base dei risultati fin qui ottenuti si propone infatti di approfondire nelle annualità successive alcune problematiche sia attraverso l'ausilio di simulazioni sia attraverso l'approccio sperimentale, la cui soluzione risulta fondamentale per procedere nel progetto del reattore.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/30.

Infine nell'ambito delle attività dell'obiettivo si sono avviati studi per lo sviluppo di un sistema di simulazione per l'analisi di sicurezza e controllo di reattori critici e sottocritici a metallo liquido pesante. In questo lavoro sono discussi gli aspetti generali di una possibile piattaforma di simulazione ingegneristica per i reattori veloci Gen IV refrigerati a piombo liquido.

Una piattaforma di simulazione ingegneristica può essere vista come un insieme integrato di codici di calcolo e modelli software che consenta di sviluppare la progettazione di un reattore di nuova generazione, in particolare per quanto riguarda le problematiche di integrazione dei vari sistemi e sottosistemi, e di iniziare ad eseguire verifiche di sicurezza (ad esempio analizzando le sequenze incidentali ritenute più probabili e/o quelle che appaiono potenzialmente più pericolose).

Tale piattaforma rappresenta il preludio alla realizzazione di un Simulatore Ingegneristico vero e proprio, ovvero un simulatore di impianto di elevato dettaglio e votato ad applicazioni quali la finalizzazione del progetto, la conduzione di attività di "Verification and Validation" di sistemi e componenti, la conduzione di verifiche particolari di sicurezza in cui è dominante la dimensione del sistema nel suo complesso, la conduzione di attività dimostrative e di comunicazione verso varie categorie di utenti, e la realizzazione di un vero e proprio "Repository" di conoscenze impiantistiche finalizzato all'obiettivo più ampio del Knowledge Management. Il Simulatore di Ingegneria potrà poi successivamente essere utilizzato per la realizzazione del Simulatore di Addestramento (necessario attorno ai 5 anni prima dell'avvio dell'impianto) ma anche per realizzare dei veri e propri Decision Support Systems da utilizzare nel corso della vita operativa dell'impianto (ad es. per prendere decisioni complesse in caso di incidenti o malfunzionamenti davanti ai quali le Procedure di Impianto risultassero inadeguate o dubbie).

Il primo step di questa classica catena di strumenti simulativi di un impianto nucleare è la Piattaforma di Simulazione Ingegneristica (PSI), un oggetto con un hardware semplificato ed un sistema software sufficiente-

mente sofisticato e completo da consentire le macro-funzionalità sopra accennate con un buon livello di confidenza e credibilità.

Il lavoro svolto non ha tenuto conto solamente delle caratteristiche dei reattori Gen IV refrigerati al piombo, ma anche del particolare momento che la Scienza e la Tecnologia Nucleari stanno vivendo dopo il grave incidente alla centrale di Fukushima nel 2011. Infatti si è tenuto pienamente conto delle Raccomandazioni prodotte da ENSREG (la rete dei Nuclear Regulators europei) a valle degli studi integrativi di sicurezza denominati "stress test", che hanno sottolineato la necessità di analizzare meglio in futuro i rischi derivanti da eventi naturali estremi, anche oltre i limiti prefissati dai criteri di progettazione.

Nuovi concetti di reattore (Gen IV) devono essere sviluppati e verificati con le più nuove e condivise tecniche di progettazione ed analisi di sicurezza. Per tale ragione si è dedicato uno spazio opportuno ai modelli software utilizzabili in una Piattaforma Ingegneristica per analizzare gli effetti di eventi estremi sulla centrale (tornado, tsunami, uragani, ecc.) e di valutare con tecniche aggiornate i processi di dispersione di inquinanti radioattivi eventualmente rilasciati in caso di incidenti severi.

La presente attività di progettazione di massima di una piattaforma simulativa è la base per realizzare nei prossimi anni la progettazione di dettaglio e la costruzione della medesima, così supportando le attività in corso di "design and verification" dei reattori refrigerati al piombo. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/029.

Nell'ambito del lavoro si sono poi svolti studi di "core compaction". La condizione affinché si abbia un corretto e sicuro esercizio degli impianti nucleari è che essi siano mantenuti in stato critico monitorabile tale da evitare qualsiasi perturbazioni dell'equilibrio neutronico e generare escursioni di reattività. Tali variazioni possono essere indotte da molteplici fattori, fra i cui tanti aspetti, in questo studio preliminare, sono stati considerati quelli di carattere strutturale correlati alla variazione della geometria del core e, in particolare, a quelli che possono determinare il fenomeno della compattazione del core. Il fenomeno della core compaction è uno degli incidenti base di progetto più temuti nei reattori a metalli liquidi, poiché la sua eventualità, soprattutto in termini di deformazioni, potrebbe determinare la perdita locale di refrigerazione e variazioni incontrollate di reattività. Questo studio preliminare ha analizzato il fenomeno della compattazione del core suddetto con riferimento al reattore ALFRED refrigerato a piombo.

Lo studio è stato articolato in:

1. Revisione dello state dell'arte: gli studi disponibili nella letteratura scientifica, seppur pochi, si riferiscono per la maggior parte a reattori refrigerati a sodio e soggetti ai fenomeni di "core compaction, bowing, fleuring", etc..
2. Sviluppo di una metodologia deterministica, mediante l'implementazione di modelli 3D delle principali strutture caratterizzanti il reattore ALFRED, capace di simulare il fenomeno della "core compaction" con maggiore accuratezza a fronte di eventi incidentali caratterizzati dall'insorgere di carichi dinamici (come ad esempio vibrazioni, sollecitazioni sismiche, carichi dinamici indotti dall'impatto di un aereo, etc.).
3. Valutazione preliminare delle deformazioni indotte nel "core region" dai fenomeni dinamici suddetti: la conoscenza preliminare del comportamento strutturale e se tali deformazioni rientrano nelle tolleranze e sono compatibili con i requisiti di sistema e di interfaccia fra i vari sistemi e componenti può permettere e/o supportare una progettazione più sicura.

La metodologia sviluppata si basa sull'approccio delle sottostrutture e fa riferimento agli effetti indotti dal terremoto base di progetto: questo evento incidentale è stato preso in esame poiché, come indicato anche in letteratura, è quello più pericoloso in relazione alle deformazioni che i carichi sismici possono causare sui sistemi, strutture e componenti del NPP, in particolar modo nei reattori a metallo liquido, che sono caratterizzati da elevate forze d'inerzia.

Pertanto, per poter simulare correttamente il fenomeno della compattazione del core sono stati, innanzitutto, realizzati un modello dell'edificio reattore, comprensivo del sistema di isolamento, ed uno del vessel. I modelli sono stati realizzati facendo riferimento ai dati di sistema e a quelli delle geometrie e materiali noti. Il comportamento dei componenti e le strutture è stato caratterizzato con le proprietà dei materiali alla temperatura di esercizio. Infine, analisi di transitorio dinamico non lineari sono state eseguite.

I risultati preliminari ottenuti dall'analisi sembrano non compatibili con i limiti di progetto. Ulteriori approfondimenti sono quindi necessari per poter caratterizzare la deformazione risultante sugli "assemblies" e determinare il grado di compattazione totale in modo più dettagliato. In tale ottica, sarebbe altresì auspicabile analizzare il medesimo fenomeno della compattazione del core nel caso di scenari incidentali differenti, tale da avere un quadro generale e comprensivo del comportamento dinamico-strutturale nella "core region" (ad esempio comportamento alle basse ed alte frequenze, etc.).

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/031.

a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione

Lo sviluppo di prodotti di fissione volatili da impianti nucleari avviene sia durante il normale esercizio degli impianti, sia a seguito di incidenti nucleari causati da improvvisi e repentini innalzamenti di temperatura. Esiste tuttavia la possibilità che tali sostanze vengano “catturate” e successivamente intrappolate in modo da eliminare o almeno ridurre il loro rilascio nell’ambiente.

A tale proposito, volendo valutare il potenziale rischio radiologico per la salute pubblica a seguito di un incidente nucleare su sistemi LFR, è stata effettuata una review relativamente ai sistemi di abbattimento degli off-gas. Il lavoro svolto dimostra come nel campo degli assorbitori o abbattitori di sostanze volatili si possa fare una distinzione tra sostanze tradizionalmente utilizzate e collaudate da decenni, e prodotti di nuova concezione e sintesi. Un campo estremamente interessante di sviluppo tecnologico riguarda la formulazione di materiali nanoporosi per la cattura di gas di fissione nel plenum di un reattore nucleare. La capacità di sviluppare un materiale di separazione meccanicamente, termicamente e radiologicamente stabile, in grado di sostenere il carico radiologico in prossimità degli elementi di combustibile è di grande interesse come metodo per rimuovere efficacemente i gas di fissione all’atto della loro formazione. Un tipo di materiali alquanto promettenti è costituito dalle nano fibre nano porose di ceramica in ossido di titanio. In virtù della loro cristallinità, dei nano pori, e della loro capacità di funzionalizzazione (zeoliti, nano particelle di argento), questi materiali sono verosimilmente adatti per sostenere le condizioni imposte dal plenum.

Nel complesso occorre osservare come, dal punto di vista dello sviluppo delle tecnologie di abbattimento, gli sforzi di ricerca e sviluppo vadano effettivamente indirizzati verso la preparazione di materiali nano strutturati e di superfici ed analisi sia teorica che sperimentale a livello micro strutturale. Per quanto riguarda invece l’utilizzo delle tecnologie di abbattimento, oltre che acquisire lo stato dell’arte sui materiali e produttori, è necessario provare i sistemi di abbattimento in definiti range di esercizio e altrettanto definite geometrie, misurando in ingresso ed uscita portate e concentrazioni.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/032.

Relativamente agli studi sulle iterazioni di gas di fissione e refrigerante il lavoro si è delineato su due linee di intervento. Da una parte si è rivisto il progetto di una apparecchiatura sperimentale presentato nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, considerando gli studi ed i risultati emersi nel progetto Europeo FBRIDGE. E’ emerso come l’utilizzo della spettrometria di miscele gassose generate da processi di desorbimento termico consenta di acquisire dati di rilascio anche su quantità molto piccole e significative ai fini dell’analisi e dell’interpretazione dei meccanismi di rilascio e trasporto di prodotti di fissione. L’analisi delle caratteristiche del combustibile nucleare di riferimento per i reattori LFR (MOX) ha messo in evidenza l’importanza dei problemi di ridistribuzione del plutonio nelle pastiglie, così come dell’ossigeno, del cesio e dello iodio.

Dall’altra parte si è svolta un’attività sperimentale sull’impianto OGATA (Off-GAs Treatment Apparatus), presso il C.R. ENEA Casaccia, progettato e realizzato per studiare le interazioni tra prodotti di fissione volatili ed il refrigerante di un reattore LFR, e la successiva “cattura” delle sostanze medesime per mezzo di adeguate “trappole”. E’ stato implementato nel dettaglio l’impianto modulare allestito presso i laboratori ENEA, e sono stati realizzati i primi esperimenti effettuati con cloruro di cesio.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/033.

Relativamente agli studi di pirometallurgia per il riprocessamento del combustibile irraggiato per la separazione attinidi/lantanidi si è reso operativo l’impianto pilota Pyrel III, realizzato nel PAR2011, mediante prove di collaudo e verifica del processo.

L’impianto è costituito da una scatola a guanti in acciaio, dotata di portello laterale per l’introduzione di apparecchiature e di posting box sul lato opposto per l’inserimento e l’allontanamento di piccoli componenti e materiali vari durante le prove. Opera in atmosfera di gas inerte (argon) e contiene, quale componente principale, un crogiolo in zirconia inserito in un vessel collegato, mediante flangia, al pavimento della scatola a guanti. L’impianto è stato installato presso il laboratorio CETRA e collegato ai vari sistemi di alimentazione: gas, utenze elettriche e idriche. Per il completamento dello stesso sono state approvvigionate ed assemblate le fasce scaldanti, il materiale per la coibentazione esterna del vessel, nonché il sistema di acquisizione dati durante le campagne sperimentali.

Nell’ambito del lavoro sono stati realizzati i componenti “fini”, vale a dire quelli inerenti all’operatività del crogiolo, quali: anodi (FDB), catodi, componenti in grafite pirolitica, termocoppie, elettrodi di riferimento, agitatore ad asta verticale, sistema di gas trapping con Tubo Venturi. Quest’ultimo rappresenta un’assoluta novità nel campo dell’elettroaffinazione, in quanto permette, da un lato, di allontanare dalla scatola a guanti dei gas

sviluppati ad elevate temperature, dotati quindi di capacità di corrosione della glove-box stessa, dall'altro consente di seguire meglio l'andamento dei processi elettrolitici associati allo sviluppo dei gas. Collegato al funzionamento del gas trapping è stato realizzato un ulteriore foro nella parete metallica della scatola a guanti, in modo da collegare l'apparecchiatura di "gas trapping" al sistema di cattura dei gas, posto esternamente. Le campagne sperimentali previste riguarderanno l'elettroaffinazione di materiali che simulano alcuni tipi di combustibile nucleare; in particolare il combustibile metallico ed il combustibile a nitrato. Successivamente saranno effettuate prove di elettroreduzione, operando un confronto tra il metodo adottato negli USA, in Corea, e in Giappone, basato sulla riduzione con cloruro di litio ed ossido di litio, ed il metodo russo, che opera invece nell'eutettico cloruro di cesio/cloruro di sodio.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/034.

Relativamente alla gestione del combustibile nucleare esausto è stata effettuata una accurata indagine al fine di stabilire lo stato dell'arte circa le tecniche di riprocessamento sperimentate con successo (idrometallurgia) e quelle ancora in fase di studio (pirometallurgia). Il lavoro mette in evidenza come il riprocessamento per via umida è ancora la tecnologia d'elezione per il trattamento di combustibile esaurito proveniente da reattori termici. Tuttavia, gli elevati burn-up (200 GWd/t) e i brevi tempi di raffreddamento (sei mesi) che si vogliono adottare per i combustibili da reattori veloci pongono delle sfide tecnologiche notevoli nell'applicazione ad essi del riprocessamento idrometallurgico. Non esiste attualmente esperienza a livello industriale per quanto riguarda il riprocessamento di combustibile con tali caratteristiche, ed è ragionevole aspettarsi che l'alto campo di radiazioni e l'elevato contenuto di Pu porranno ulteriori difficoltà nella ricerca di estraenti efficaci. Il trattamento in soluzione di combustibile da FR, sia esso in forma di ossido, carburo o nitrato, si baserà sul processo PUREX (Plutonium-URanium EXtraction) che utilizza il tributillfosfato (TBP) come principale estraente. Grazie agli intensi sforzi fatti finora nell'ambito della sintesi di nuovi leganti, diversi candidati sono attualmente disponibili, ma ancora molto deve essere fatto per poterli adottare a livello industriale in sostituzione del TBP. La semplificazione dei processi idrometallurgici multistadio comporterebbe la riduzione dei costi del riprocessamento e, contemporaneamente, la riduzione della quantità di rifiuti liquidi generati dai trattamenti, così come dei rifiuti solidi contaminati, che devono poter essere inceneriti senza produrre rifiuti secondari. Infine gli impianti e le attrezzature, che attualmente operano il processo PUREX, devono poter soddisfare le necessità legate al riprocessamento di questi nuovi combustibili, integrando se possibile le facility per la fabbricazione del nuovo combustibile. Tutti questi aspetti restano quindi aree di grande interesse per le attività di ricerca e sviluppo.

La separazione degli attinidi minori (MA) e la loro trasmutazione in reattori veloci di IV generazione o in sistemi ADS, unitamente alla separazione dei prodotti di fissione a vita più lunga, è un punto fondamentale per la definizione di nuovi cicli del combustibile avanzati e per lo sviluppo sostenibile dell'energia nucleare, poiché consentirebbe di ridurre i volumi di rifiuti da stoccare e le dimensioni dei depositi, con i vantaggi che questo porterebbe dal punto di vista dell'accettabilità sociale di questa tecnologia. Attualmente, seppur molti studi in ambito internazionale abbiano portato alla formulazione di flow sheet di processi per il partitioning di MA dimostrati su scala di impianto pilota, ancora non vi è alcuna applicazione a livello commerciale. Per quanto riguarda i prodotti di fissione a lunga vita, quali ^{137}Cs e ^{90}Sr , essi sono contenuti in quantità rilevante nei HLW derivanti dal trattamento di combustibili da FR, tuttavia non esiste esperienza diretta del suo recupero su combustibile esaurito da FR. C'è inoltre una crescente attenzione anche al recupero di isotopi stabili che potrebbero avere un'utilità in ambito industriale. Un esempio è il palladio che è contenuto in quantità significative nel combustibile a base di Pu con elevati burn-up: il suo recupero non solo eviterebbe il problema dell'incompatibilità del Pd con la matrice vetrosa nella fase di immobilizzazione del waste, ma renderebbe disponibile notevoli quantità di questo elemento per opportune applicazioni industriali.

Il riprocessamento per via pirometallurgica è sicuramente un'alternativa importante al riprocessamento per via umida: la sua fattibilità sia per il trattamento di combustibili in forma metallica che di ossidi è stata dimostrata sia negli USA che nella Federazione Russa, e uno studio giapponese ha concluso che un impianto in grado di trattare 50 t/a costituisce una via più economica rispetto alla tecnologia idrometallurgica, tuttavia il punto cruciale sta nella possibilità di sviluppare i processi pirochimici in continuo. L'utilizzo di Sali cloruri fusi richiede temperature intorno ai 500-550°C, quindi lo sviluppo di sistemi con temperature di funzionamento più basse e di materiali che siano compatibili costituisce argomento di intense ricerche in ambito internazionale. Inoltre, molto deve essere ancora fatto sul fronte dell'immobilizzazione dei Sali derivanti dal riprocessamento pirochimico. L'esperienza acquisita in ambito pirometallurgico è sicuramente di molto inferiore rispetto a quella dei processi idrometallurgici, tuttavia c'è da aspettarsi che la ricerca in questo ambito subirà un notevole slancio, giustificato dai vantaggi insiti nella tecnologia pirometallurgica, principalmente legati alla resistenza alla proliferazione nucleare e alla capacità di trattare combustibile ad elevato burn-up e breve tempo di raffreddamento.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/035.

Si è inoltre proseguito sugli studi sulla interazione fuel-coolant in sistemi multicomponente, anche con approccio ad ab-initio, tipici degli scenari incidentali che portano alla degradazione del nocciolo e fessurazione della guaina. Il lavoro svolto ha permesso di ottenere importanti risultati e ha posto le basi affinché ricerche future possano approfondire l'interazione tra combustibile e termovettore in LFR.

Per quanto riguarda lo studio dell'equilibrio termodinamico del sistema costituito da una miscela di ossidi di U e Pu in Pb fuso è stato utilizzato un codice di tipo SOLGASMIX che minimizza l'energia libera di Gibbs per trovare la configurazione di equilibrio. Per eseguire le simulazioni del sistema UO_2 - PuO_2 -Pb è stato necessario completare il database delle grandezze termochimiche e apportare una modifica al codice per poter trattare composti non stechiometrici. I risultati ottenuti sono incoraggianti, poiché dimostrano che il sistema è chimicamente stabile fino a una temperatura di 1150 K. A temperature superiori si osserva una instabilità che porta alla formazione di ossidi con diverse stechiometrie rispetto alla composizione iniziale.

Per studiare un sistema più vicino al caso reale si devono introdurre nell'analisi i principali elementi della guaina e i prodotti di fissione. Il problema con cui ci si scontra è la carenza di dati termochimici per alcuni composti tra An, Pb, prodotti di fissione ed elementi della guaina. Si è quindi resa necessaria una ricerca bibliografica per individuare i metodi computazionali migliori, in termini di maggior accuratezza e minor costo di calcolo, in grado di calcolare le grandezze termochimiche mancanti.

Tra i metodi semi-empirici, è stato individuato l'approccio di Miedema, che consente di ricavare entalpia di formazione e di soluzione di composti metallici binari. La validazione del metodo al caso studio è stata eseguita confrontando i valori di entalpia di formazione sperimentali degli intermetallici tra U e Pb con quelli calcolati, trovando un ottimo accordo. Sono stati quindi studiati gli intermetallici tra Pu e Pb, mentre lo studio degli altri composti binari è tuttora in corso. È altresì stata validata con successo un'estensione del metodo di Miedema per ricavare le entalpie mancanti degli ossidi dei costituenti della guaina e dei FP. Infine, l'estensione dello studio ai composti ternari verrà affrontata nei prossimi mesi.

Tra i metodi ab initio, è stato sperimentato l'approccio DFT (Density Functional Theory) per lo studio di composti contenenti attinidi. A fronte di un elevato onere computazionale, tale metodica garantisce una buona accuratezza, sebbene richieda che venga esplorato lo spazio delle possibili conformazioni della molecola in esame, al fine di determinare quella di equilibrio. Tramite questo approccio si ottiene la geometria molecolare e, conseguentemente, le grandezze vibrazionali, che sono il punto di partenza per il calcolo di proprietà termochimiche, quali l'entropia, l'entalpia e il calore specifico. L'approccio DFT è stato validato al caso studio e si è verificato che la chimica quantistica computazionale è un valido strumento per studiare in maniera semi-sistematica composti attinoidi. Ad oggi è stata studiata solo la fase gas di composti intermetallici U-Pb, nei prossimi mesi si intende studiare anche gli altri composti di interesse.

A supporto di tutto ciò si è svolta una attività sperimentale presso i laboratori ENEA del Centro Ricerche Casaccia, indirizzata alla valutazione delle interazioni tra il refrigerante costituito da piombo fuso e alcune specie chimiche (ossido di cerio, cloruro di cesio, antimonio metallico, ioduro di potassio, ossido di stronzio, ossido di europio) simulanti prodotti della fissione del combustibile UO_2 , con il fine ultimo di ipotizzare il comportamento dell'ossido di uranio nel caso di una rottura della guaina di contenimento del combustibile nucleare ed il conseguente contatto tra quest'ultimo ed il refrigerante. Le prove sperimentali hanno evidenziato come, per le sostanze chimiche prese in esame, non ci sia interazione di tipo chimico, e le stesse si limitino a "galleggiare" sul refrigerante liquido. Sulla base dei risultati ottenuti è stata formulata l'ipotesi che, qualora in presenza di ossido di uranio (IV) non si avessero, come è probabile, interazioni chimiche tra il medesimo e il piombo fuso, UO_2 dovrebbe andare a fondo o, quantomeno, non galleggiare sulla superficie del piombo.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/2013/036.

b. Materiali e Fabbricazioni

b.1 Qualifica coating e materiali strutturali per sistemi LFR

In continuità con il precedente Piano Annuale di Realizzazione, in cui si è provveduto alla selezione (Al_2O_3 - formers) e alla deposizione (arc-PVD) di rivestimenti per la protezione dei materiali strutturali operanti in piombo. L'attività ha previsto la realizzazione e successiva caratterizzazione microstrutturale, morfologica e meccanica di rivestimenti di FeAl, FeCrAl e Al_2O_3 propedeutici alla realizzazione di sistemi multistrato per la protezione degli acciai dalla corrosione da metalli liquidi pesanti. In continuità e ad integrazione dell'attività in precedenza, per la deposizione del sistema multilayer sono state selezionate tecnologie di deposizione PVD (rapporto RdS/2013/037). In particolare, nella attività sperimentale svolta è stato utilizzato il processo RF magnetron sputtering per la deposizione del top layer, tecnologia adatta alla deposizione di film di ossido, mentre i rivestimenti metallici

dell'interlayer e dell'adhesion layer sono stati prodotti con la tecnologia arco. I rivestimenti sono stati oggetto di un'ampia e completa campagna sperimentale di caratterizzazione principalmente volta a investigare la natura dei rivestimenti prodotti, la loro morfologia, microstruttura e adesione al substrato. I campioni forniti sono stati sottoposti a misure di diffrazione a raggi X, osservazione al microscopio elettronico a scansione per investigare la morfologia, l'omogeneità, e stimarne lo spessore; microanalisi di spettroscopia a dispersione di energia per valutare qualitativamente la composizione chimica e la distribuzione degli elementi costituenti, test di flessione (bending) a tre punti per stimarne l'adesione al substrato.

In parallelo si sono realizzati studi e prove sui processi di deposizione per ablazione laser o PLD (Pulsed Laser Deposition), che rappresenta una scelta alternativa ma molto promettente. Dopo una descrizione del processo di sintesi, nel rapporto RdS/2013/038 sono illustrati i risultati delle caratterizzazioni microstrutturale, morfologica e meccanica. Sono stati fabbricati dei rivestimenti di Al_2O_3 su substrato AISI 316L tramite ablazione laser a temperatura ambiente presso il Center for Nano Science and Technology dell'Istituto Italiano di Tecnologia. I campioni sono stati caratterizzati tramite XRD, SEM e prove di piega presso l'Università di Roma "Tor Vergata". Al termine della campagna sperimentale condotta si è osservato come tutti i rivestimenti prodotti risultano molto compatti, omogenei e adesi al substrato. Inoltre, la presenza di difetti è assolutamente trascurabile su tutti i campioni analizzati. Nei casi in cui sono presenti difetti di crescita, essi sono riconducibili a una preparazione non ottimale delle superfici. I rivestimenti risultano essere prevalentemente amorfi sebbene dopo trattamento termico sia stata osservata la presenza di picchi poco intensi riferibili ad una fase cristallina, in particolare allumina fase gamma. Infine le prove di piega hanno mostrato un'eccezionale aderenza dei campioni al substrato sebbene la loro natura intrinsecamente fragile abbia comportato la presenza di cricature uniformi nel coating parallelamente alla direzione di piegatura. Infine è da evidenziare le ottime prestazioni del campione spesso $10\ \mu m$ che è risultato molto compatto e ha ben resistito alle prove di piegatura nonostante l'elevato spessore.

Per la completa caratterizzazione dei coating prodotti si è provveduto a progettare prove di irraggiamento con ioni pesanti di rivestimenti di allumina prodotti per ablazione laser da eseguire presso la piattaforma sperimentale JANNUS dei centri di ricerca CEA di Saclay e di Orsay (rapporto RdS/2013/039). In confronto all'utilizzo di neutroni, gli ioni pesanti hanno il vantaggio di permettere il raggiungimento di un danno da irraggiamento elevato in tempi brevi ed a bassi costi, il tutto senza attivare i campioni irraggiati, il che facilita la loro successiva caratterizzazione. I campioni irraggiati verranno caratterizzati con prove di nanoindentazione, scratch e spettroscopia Brillouin, per valutarne le proprietà meccaniche. I campioni saranno inoltre caratterizzati dal punto di vista della microstruttura tramite analisi XRD, SEM, spettroscopia Raman e TEM ex-situ. Per seguire l'evoluzione della struttura durante l'irraggiamento saranno eseguite osservazioni TEM in situ durante gli esperimenti di irraggiamento.

Infine, a supporto dello sviluppo di rivestimenti protettivi, si sono completati i locali presso il C.R. Brasimone e l'installazione dei servizi ausiliari per il collaudo della macchina per Detonation Spray in precedenza acquistata (rapporto RdS/2013/040). In seguito si dovrà provvedere alla formazione del personale addetto all'utilizzo, e quindi alla realizzazione di campioni ricoperti di diversa tipologia (FeAl, Fe_3Al , FeCrAl, etc.), che potranno quindi essere successivamente testati negli impianti e laboratori di prove materiali dell'ENEA.

Infine, si sono progettate e avviate prove termomeccaniche a lungo termine di tipo "Creep-Rupture" su materiali strutturali acciai austenitici e acciai ferritici/martensitici) ricoperti a base di FeAl, FeCrAl e TiN simulando le condizioni operative tipiche del sistema LFR (rapporto RdS/2013/041). Le prove sono quindi eseguite ad elevata temperatura, circa $550^\circ C$, in ambiente altamente corrosivo (Pb) e in atmosfera inerte/riducente. Per tale ragione si è reso necessario modificare ed implementare la strumentazione presente presso i laboratori di caratterizzazione termomeccanica "creep" presenti nei Laboratori ENEA di Faenza. Nello specifico si è dovuto provvedere alla realizzazione di una linea di gas inerte/riducente dedicata ad ogni singola macchina di prova e si è avviata la progettazione di una camera di prova che possa operare in piombo e collegata alle macchine di creep.

b.2 Studi ed esperienze sulla chimica del refrigerante e sulla fabbricazione di componenti prototipici

In continuità con quanto realizzato nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, si è proceduto con gli studi di fabbricazione relativi a componenti prototipici del sistema primario di un sistema LFR progettati da ENEA (rapporto RdS/2013/042). In particolare FN SpA, sulla base delle indicazioni di input da parte ENEA/Ansaldo Nucleare, ha condotto le attività di progettazione della griglia spaziatrice per la realizzazione del mock-up di elemento di combustibile per reattore LFR in geometria esagonale (tipo ALFRED). Sono stati individuati i materiali per la scatola esagonale, per le barrette simulanti le guaine contenenti il combustibile e per la griglia spaziatrice, e sono stati progettati e realizzati componenti di attrezzature necessarie sia per coadiuvare/validare la progettazione effettuata, sia per eseguire dei passi di processo (piegature). Si sono poi realizzate prove preliminari per valutare le caratteristiche di durezza e di lavorabilità delle lamine incrudite di 15-15 Ti e si sono valutati i trattamenti termo-meccanici da effettuare sui materiali identificati per la griglia spaziatrice al fine di ottenere il

miglior compromesso fra le caratteristiche di resistenza alla piegatura ed alla possibilità di ottenere l'“effetto molla” durante l'esercizio, soprattutto nelle condizioni di temperatura richieste. Infine si è definito il ciclo di lavoro per ottenere le componenti della griglia e sono state individuate le tecniche di lavorazione più idonee alle specifiche geometriche di tali componenti.

In particolare, il ciclo di lavoro consta delle seguenti fasi:

1. segnatura delle lamine per contornare i rettangoli da cui saranno ricavate le componenti della griglia;
2. foto - trancitura chimica di più componenti di griglia per lamina in funzione della lunghezza e dell'area occupata dai singoli componenti, con effettuazione di tagli (asole e linguette);
3. deformazione mediante pressa attrezzata con stampo apposito per ottenere supporti fissi (bugne);
4. piegatura uncini con stampo appositamente progettato.

Si sono quindi realizzati i disegni esecutivi delle 14 componenti della griglia, e si sono realizzate prove di fattibilità realizzando alcuni prototipi di componenti di griglia mediante foto-trancitura chimica e successiva realizzazione di bugne e di uncini. Infine i prototipi di componenti di griglia sono stati assemblati su tubi O.D. 10,5 mm, appositamente tagliati a misura e disposti secondo la geometria prevista dalla configurazione ALFRED (figura 328)



Figura 328. Griglia spaziatrice del DEMO-LFR ALFRED (FN SpA)

Dalle prove effettuate sono state ricavate informazioni utili sia per un'ulteriore semplificazione della griglia nell'ottica dell'assemblaggio con guaine contenenti materiale radioattivo e delle problematiche che possono insorgere nell'atto del calettamento del fascio tubiero nel tubo esagonale, sia per quanto riguarda la sperimentazione di ulteriori prove circa i trattamenti da effettuare sui materiali base individuati per la griglia al fine di garantire la formabilità delle piegature/bugne e le caratteristiche meccaniche in temperatura che permettono di mantenere le barrette di combustibile nella loro posizione anche in presenza di piombo fuso. La sperimentazione può continuare con la progettazione e realizzazione di un banco di assemblaggio e delle attrezzature necessarie per la realizzazione dei componenti di griglia a livello semi-industriale.

Coerentemente agli obiettivi di sviluppo e validazione di un sistema di controllo e monitoraggio della chimica del refrigerante, sono state intraprese da ENEA azioni tese alla definizione e implementazione di un laboratorio per la chimica del refrigerante (piombo). In particolare si è allestito un apposito locale con banchi da laboratorio e cappe aspiranti in acciaio, resistenti alle elevate temperature. Su tale locale sono stati effettuati interventi di ristrutturazione edili ed elettrici per renderlo idoneo agli utilizzi preposti. Si sono quindi installate e strumentate 5 capsule sperimentali per test di corrosione in piombo statico a basso ossigeno, con relativo sistema di potenza, controllo e acquisizione. Si è avviata la predisposizione per successive 5 capsule. Il lavoro svolto è descritto nel rapporto RdS/2013/043.

Infine si è provveduto a progettare e realizzare una macchina per il decapaggio e la pulizia di componenti di grosse dimensioni (fino a 1 ton) che hanno operato in piombo, e che richiedono di essere modificati e/o riparati per del loro reintegro negli impianti sperimentali (rapporto RdS/2013/044).

c. Termoidraulica del refrigerante

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si è progettato e realizzato uno scambiatore di calore prototipo con tubi a baionetta a doppia parete (HERO - Heavy liquid metal - pressurized water cooled tube) da installare nella facility CIRCE presso il C.R. Brasimone (rapporto RdS/2013/045).

Lo scambiatore di calore, costituito da 7 elementi a baionetta, e della potenza complessiva di 500 kW, rappresenta un simulatore in scala 1:1 sulle geometrie, e 1:75 in potenza, del generatore di vapore del DEMO-LFR ALFRED. Ogni elemento a baionetta, costituito da 4 tubi coassiali, accoppia termicamente il fluido di refrigerazione secondario (acqua in pressione a 180 bar, temperatura massima 450°C) con il piombo primario attraverso un gap

di polvere (SiC) dello spessore di circa 1 mm. Il gap di polvere consente l'accoppiamento termico, ma con l'aggiunta di una barriera è possibile monitorare l'integrità del componente (mediante elio in pressione nel gap di polvere) e ridurre gli stress termomeccanici sul componente, a beneficio della sua affidabilità strutturale.

Lo scopo di HERO è dunque quello di verificare la fabbricabilità dei tubi del generatore di vapore dell'impianto prototipico ALFRED (LFR), oltreché di caratterizzarne le performance di scambio termico, verificandone la temperatura di uscita del vapore surriscaldato. L'apparecchiatura realizzata consentirà inoltre di caratterizzare il funzionamento di sette tubi in scala 1:1 simultaneamente. La strumentazione è stata definita allo scopo 1) di poter misurare in modo dettagliato lo scambio termico tra tubo interno e tubo anulare, attraverso le polveri di SiC, tra acqua e LBE; 2) di rilevare e quantificare instabilità termoidrauliche nei tubi in specifiche condizioni operative, 3) di controllare in modo accurato le condizioni al contorno in modo da effettuare esperimenti rilevanti per la qualifica di codici di calcolo.

In continuità con le azioni sviluppate nel precedente PAR, il lavoro svolto ha permesso di completare la caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW installato sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (Integral Circulation Experiment, Figura 329), verificandone prestazioni e affidabilità in diverse condizioni operative (rapporto RdS/2013/046).

Inoltre nell'ambito delle stesse prove sperimentali realizzate si è potuto investigare le prestazioni del sistema primario di un sistema LFR (scala 1 MW) in regime di circolazione forzata e circolazione naturale, investigando in dettaglio la transizione tra convezione forzata e circolazione naturale tipica di un evento di station-blackout.

Sono state realizzate infine prove di long-term station blackout (*like Fukushima*), della durata di quasi una settimana, verificando le attitudini del sistema LFR a sopportare eventi incidentali così gravosi. I dati ottenuti non solo permettono di valutare i fenomeni termoidraulici tipici di un sistema a piscina (tipicamente 3D) ma permettono di disporre dati sperimentali utili alla validazione di codici di calcolo quando applicati in sistema a piscina refrigerati a metallo liquido pesante.

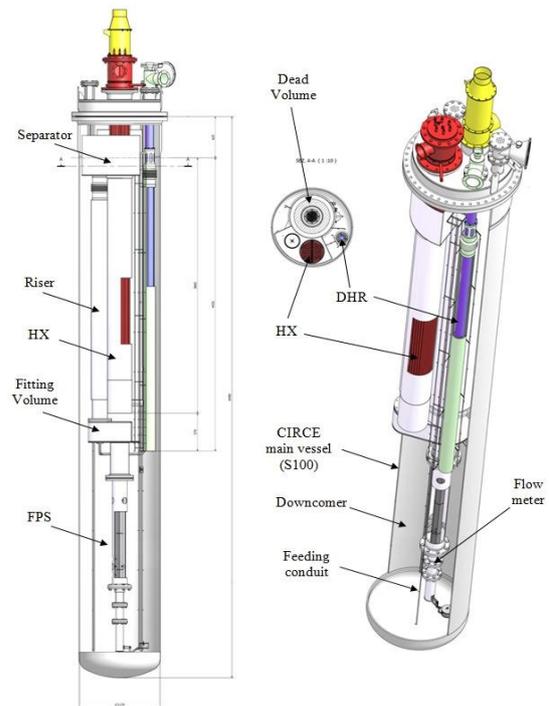


Figura 329. Sezione di prova ICE

L'esperimento CIRCE, unico nel suo genere, permette a ENEA e al Sistema Industriale italiano di disporre della più importante infrastruttura di ricerca a livello mondiale per la caratterizzazione sperimentale di sistemi LFR.

Ancora nell'ambito della termoidraulica dei sistemi liquidi, si è proceduto come pianificato alla installazione e collaudo (presso il C.R. ENEA Saluggia) del prototipo di generatore di vapore a spirale piana (figura 330) realizzato nel precedente piano, qualificandone le prestazioni in termini di scambio termico e robustezza termomeccanica con prove severe di sollecitazione termica in aria. L'attività ha dimostrato la fattibilità del generatore di vapore a tubi a spirale piana e suggerito importanti miglioramenti progettuali per il GV destinato al reattore LFR (rapporto RdS/2013/047).

Le prove hanno indicato l'assenza di rumore e di vibrazioni percepibili anche a portate superiori a quella nominale, una sostanziale conferma del coefficiente di scambio globale dei tubi, la presumibile assenza (o comunque non meccanicamente significativa) di instabilità di portata acqua.



Figura 330. Vista del Generatore di Vapore a spirale piana per applicazione in sistemi a piombo

Poiché ad oggi il mock up realizzato e l'installazione di prova di Saluggia sono l'unica opportunità per approfondire gli studi sul GV a tubi a spirale e l'installazione è relativamente flessibile e relativamente facilmente esercibile, si prevede di continuare la campagna di prova introducendo dei dispositivi lato aria e lato vapore dei quali, in sede di progetto del mock up, era già stata prevista la possibilità d'inserimento.

Per quanto riguarda gli studi sull'accoppiamento dei codici di calcolo al fine di disporre di sistemi di calcolo efficaci e affidabili che possano supportare la progettazione e la verifica di sicurezza dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo, parte dell'attività è consistita nello sviluppo e nel miglioramento di tecniche e strumenti per l'accoppiamento tra codici di Fluidodinamica Computazionale (CFD) e codici termoidraulici di sistema (rapporto RdS/2013/048).

Il lavoro svolto costituisce un proseguimento dell'analoga attività svolta nella precedente annualità. Tale attività iniziale consisté in un'analisi dello stato dell'arte sull'accoppiamento di codici (mediante opportuna ricerca documentale) e nello sviluppo preliminare di uno strumento software per l'accoppiamento, che di fatto costituì una prova di fattibilità, e permise di identificare con maggior dettaglio i punti chiave che una successiva attività di sviluppo avrebbe necessariamente dovuto affrontare.

Il lavoro svolto nel presente ambito ha seguito la strategia di sviluppo precedentemente definita, con l'obiettivo generale di mettere a punto (cioè sviluppare, migliorare e testare) uno strumento di accoppiamento tra codici CFD e di sistema, e con i seguenti obiettivi specifici:

- migliorare il metodo numerico di accoppiamento, con particolare riferimento alle caratteristiche di robustezza, stabilità, efficienza;
- investigare l'influenza di parametri di "sensibilità" precedentemente identificati;
- sviluppare una interfaccia grafica per l'Utente, che consenta un'utilizzazione più intuitiva ed efficiente dello strumento di accoppiamento;
- estendere la base di verifica e validazione (V&V).

Come risultato dell'attività svolta, è stato dunque ottenuto uno strumento di accoppiamento, dotato di interfaccia grafica, basato su un'architettura numerica che è stata oggetto di successive fasi di miglioramento. Tale strumento è stato sottoposto a diversi "test" di varia complessità (attività di V&V) e, nei limiti di applicabilità definiti dai test effettuati, risulta efficacemente utilizzabile. Naturalmente i suddetti obiettivi, specialmente per quanto riguarda gli aspetti di V&V, richiedono un impegno complesso e di lungo termine che va ben oltre l'ambito e le risorse previsti nel presente contesto.

In parallelo si è svolto un lavoro che ha visto l'accoppiamento del codice di sistema RELAP5 con il codice CFD FLUENT. In particolare si è provveduto ad una analisi di post-test sia dei risultati sperimentali ottenuti con la facility NACIE, sia con quelli ottenuti con la facility CIRCE in configurazione DHR.

I risultati ottenuti dal codice RELAP5 (calcoli stand alone), e dall'accoppiamento RELAP5-FLUENT sono poi stati confrontati con i dati sperimentali disponibili. I risultati ottenuti sono in ottimo accordo con quelli sperimentali, dimostrando sia la capacità del codice RELAP5 di simulare sistemi refrigerati a metallo liquido quando i fenomeni fisici in gioco hanno strutture prevalentemente 1D (loop), sia le performance potenziali di codici accoppiati nel simulare sistemi in cui fenomeni fisici a struttura 3D non possono essere trascurati o approssimati. Il lavoro svolto è descritto nel rapporto RdS/2013/049.

Relativamente allo sviluppo del codice multiscala agli elementi finiti FEM-LCORE, si è proseguito lo sviluppo di moduli tridimensionali e monodimensionali di tipo CDF e CFD-poroso (rapporto RdS/2013/050). Il circuito primario del reattore, il plenum ed il core sono modellati a tre diverse scale di grandezza, rispettivamente con un modulo 1D-poroso, 3D-CFD e 3D-poroso. Le soluzioni sono accoppiate alle diverse scale al fine di risolvere le equazioni di bilancio della massa, della quantità di moto e dell'energia attraverso un unico risolutore.

Il lavoro è strutturato in tre parti. Nella prima parte, dedicata all'approccio multiscala, sono presentate le equazioni nei vari moduli ed il metodo di accoppiamento tra gli stessi. Nella seconda parte, usando il modello sopra introdotto, vengono descritti i vari componenti del reattore. Vengono poi presentati i risultati delle simulazioni ottenuti in regime di convezione naturale a diversi livelli di potenza del reattore. In particolare viene mostrata l'evoluzione dei campi di temperatura, velocità e pressione nella parte tridimensionale del reattore (core e plenum) e nel circuito primario. L'ultima parte del lavoro consiste nella descrizione del modello di congelamento attraverso il quale vengono studiati alcuni semplici casi in cui, a causa di eccessivo raffreddamento del refrigerante per via di un malfunzionamento nello scambiatore di calore, una miscela di piombo solido e liquido viene iniettata nel reattore. I test in convezione naturale mostrano che il calore di decadimento può essere rimosso facilmente se le perdite di carico nel core e nel generatore di vapore sono trascurabili. Per questo motivo la progettazione di quest'ultimo componente risulta cruciale al fine di garantire una sicurezza intrinseca a questo tipo di reattori.

Il modello fisico dei fenomeni di congelamento deve essere migliorato insieme al modello della rimozione di calore nel circuito primario. In questa ottica si può pensare di introdurre un nuovo modulo tridimensionale per la simulazione diretta del generatore di vapore. Poiché le diverse parti del sistema vengono analizzate a differenti

scaie di grandezza, è facile capire come la qualità della soluzione dipenda dal loro buon accoppiamento. In particolare quello tra il core ed i piena può essere sicuramente studiato con l'attuale versione del codice mentre l'interfaccia con il circuito primario è ancora oggetto di indagine e di perfezionamento. Un ulteriore miglioramento potrebbe in fine essere l'accoppiamento tra FEM-LCORE e un codice di sistema come CATHARE, al fine di simulare l'intero circuito primario all'interno della piattaforma SALOME. Al momento i moduli di integrazione FEM-LCORE-SALOME CATHARE-SALOME sono ancora in fase di sviluppo.

c.2 Studi sperimentali per lo scambio termico nei sistemi LFR e SMR

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo tese al supporto dei sistemi LFR e SMR refrigerati a piombo, e a completamento di quanto già realizzato nel precedente piano annuale, si è provveduto al completamento della infrastruttura di ricerca a metallo liquido pesante HELENA, presso il C.R. Brasimone (rapporto RdS/2013/051).

L'impianto, che sarà ampiamente utilizzato per la caratterizzazione dei materiali strutturali per metalli liquidi pesanti in ambiente a basso tenore di ossigeno, e per la caratterizzazione dello scambio termico in fuel pin bundle prototipici in regime di circolazione forzata, si inserisce nella attività di ricerca e sviluppo che ENEA realizza in ambito europeo.

In particolare è stato elaborato il progetto di massima e la definizione dei componenti del circuito secondario ad acqua in pressione (100 bar) dell'impianto. L'impianto a metallo liquido pesante HELENA è un loop con fluido circolante piombo puro ed è stato costruito per test componenti, corrosione materiali e studi termoidraulici. Nel circuito primario è presente una pompa di circolazione prototipica (centrifuga) per piombo ed uno scambiatore di calore innovativo. Inoltre è presente una sezione prova valvole a sfera. Per i primi test isoterma sulla pompa di circolazione non sarà necessario il circuito secondario.

Quest'ultimo si rivelerà indispensabile quando verranno effettuati i test termoidraulici in circolazione forzata con bundle prototipico 19 pin della potenza di 250 kW complessivi. In questo caso il circuito secondario costituirà il pozzo freddo del circuito primario e dovrà lavorare accoppiato a quest'ultimo.

Il lavoro svolto comprende quindi la descrizione dei seguenti componenti del circuito secondario ad acqua in pressione (100 bar): scambiatore di calore, pressurizzatore, pompa di circolazione secondaria, air cooler, tubazioni, valvole, strumentazione. I dettagli realizzativi di tali componenti e l'effettiva realizzazione del circuito secondario verrà completata nell'ambito del Piano triennale.

Sempre a completamento dell'impianto HELENA si è elaborata la logica del sistema di acquisizione e controllo (DACs). Il documento RdS/2013/052 descrive il processo su cui poi costruire la logica di controllo e dunque descrive tutti i transitori di impianto e le condizioni di prova, e per ogni condizione indica quali segnali devono essere acquisiti e quali segnali vanno attuati. Il documento costituisce il riferimento fondamentale su cui si è basata la progettazione del sistema di acquisizione e controllo.

Gli stati o le procedure analizzate e descritte sono:

- inertizzazione;
- pre-riscaldamento;
- riempimento e drenaggio primario;
- stand-by;
- start-up secondario;
- circolazione forzata isoterma (pompa);
- procedura test section valvole;
- circolazione forzata a piena potenza;
- recupero piombo da baderna della pompa;
- drenaggio circuito secondario.

Il documento delinea una metodologia generale da seguire per arrivare alla definizione ed alla realizzazione del sistema di acquisizione e controllo basato su precise esigenze di processo e può essere applicato ad altri impianti. Le esigenze di processo sono determinate a partire dagli esperimenti che bisogna compiere sull'impianto, ciò consente di ottimizzare le risorse e minimizza le modifiche a posteriori sul DACs.

Relativamente agli studi di scambio termico in fuel pin bundle prototipici in regime di circolazione naturale o mista, si è avviato l'upgrade dell'impianto NACIE, inserito nel progetto europeo SEARCH (FP7-EC). L'attività prevede la progettazione e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione (16 bar) e la modifica del circuito di fill&drain che premetta di ospitare un fuel pin bundle prototipico evitandone il plugging nelle procedure di avvio e drenaggio di impianto.

Il lavoro svolto ha permesso il design del circuito secondario di acqua in pressione (16 bar) dell'impianto. Gran parte dei componenti del circuito secondario (scambiatore di calore, pompa di circolazione, aeroterma) sono stati già acquistati e si trovano presso il C.R. ENEA Brasimone (rapporto RdS/2013/053). Il circuito secondario verrà completato e realizzato in via definitiva nell'ambito del prossimo PAR.

Per garantire la possibilità di pre-test sull'accoppiamento primario-secondario, si è realizzato un modello numerico CFD della sezione a bassa potenza (0-30 kW) dello scambiatore di calore. Il modello riproduce la geometria reale dello scambiatore di calore ed include la parte acqua lato mantello, LBE lato tubi, i tubi in acciaio inossidabile interno ed esterni ed il gap di polvere. Queste ultime tre strutture sono trattate come solide e trasmettono il calore per conduzione, mentre le equazioni di Navier-Stokes con modello di turbolenza sono state risolte nei domini fluidi. In tal modo il modello è un 3D pieno ed include lo scambio termico coniugato conduttivo-convettivo. Il modello si è dimostrato robusto ed affidabile nella previsione della potenza totale scambiata e delle distribuzioni di temperatura nelle varie strutture. Per la conducibilità termica nella polvere di acciaio interposta nel gap tra i tubi dello scambiatore di calore vengono utilizzati i dati derivati dagli esperimenti sulla facility TxP (Tubes for Powders).

Relativamente all'up-grade dell'impianto NACIE si è elaborata la specifica tecnica di fornitura installazione e collaudo dell'impianto in configurazione di upgrade (NACIE-UP, rapporto RdS/2013/054). NACIE-UP risulta essere un upgrade dell'esistente impianto NACIE, di cui rimane integro il vaso di espansione e tubazioni collegate ed il circuito ausiliario gas. Nel rapporto RdS/2013/054 viene riportato il P&ID e descritta la fornitura e le lavorazioni sul: circuito primario, sistema di fill&drain; strumentazioni di servizio. Alla specifica sono allegati i disegni tecnici che riportano le lavorazioni, il circuito primario inserito nella hall sperimentale PEC del C.R. Brasimone e tutti i particolari sulle penetrazioni.

Il componente più delicato del circuito primario è comunque un bundle elettrico strumentato di 19 pin modellato sul riferimento dell'elemento di combustibile della facility di irraggiamento MYRRHA. Si ricorda inoltre che è stata avviata una attività di collaborazione scientifica con l'HZDR (Dresda, Germania) e questa collaborazione ha portato alla realizzazione di un misuratore di prototipico contactless in piombo che è stato già testato e verrà installato sul circuito primario di NACIE-UP.

Il circuito NACIE-UP, una volta ultimato, consentirà di provare la refrigerabilità dell'elemento di combustibile di MYRRHA in condizioni incidentali e di ottenere informazioni sulle temperature di guaina e sui coefficienti di scambio termico. L'impianto e la successiva campagna sperimentale saranno realizzati in sinergia con il progetto europeo FP7 SEARCH.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

I principali soggetti esterni coinvolti nel progetto di ricerca "Sviluppo Competenze Scientifiche nel Campo della Sicurezza Nucleare e Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV Generazione" sono: CIRTEN, FN Spa e SIET SpA.

CIRTEN Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare (co-beneficiario)

L'impegno del Consorzio CIRTEN per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell'ENEA, comprende attività svolte presso le seguenti Università consorziate: Politecnici di Milano e Torino, Università di Palermo, Pisa, Roma Sapienza, Padova e Bologna. Tali attività vengono riportate in sintesi in quanto segue, con riferimento alle 2 Linee Progettuali ed ai singoli obiettivi del PAR-2012.

LINEA PROGETTUALE 1: SVILUPPO COMPETENZE SCIENTIFICHE NEL CAMPO DELLA SICUREZZA NUCLEARE

Politecnico di Milano

c.1 Studi per il completamento della Facility SPES3 presso la SIET

Lo scopo dell'attività portata avanti dal Politecnico di Milano per la valutazione del possibile completamento della facility SPES3 presso la SIET ha riguardato in particolare l'inquadramento della facility in un contesto internazionale, mettendone in evidenza l'importanza strategica per la comunità nucleare con particolare riguardo al segmento di mercato relativo ai Small-Medium Modular Reactors e come l'industria italiana potrebbe contribuire al suo completamento.

I possibili contributori industriali individuati dal Politecnico di Milano sono compagnie ancora attive nel settore nucleare (SIET - Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche, ATB Riva Calzoni, Officine Resta, Morandini)

come fornitori internazionali di componentistica e di servizi. Nel panorama internazionale in cui il segmento di mercato degli SMR sta conseguendo un continuo aumento di interesse nel mondo, l'industria italiana potrebbe assumere, attraverso il progetto SPES-3, un ruolo significativo in questo settore, presentando ed offrendo esempio di un prodotto completo, dalla validazione sperimentale allo sviluppo industriale ed alla realizzazione. Il completamento della facility SPS3 proverebbe questo insieme organico di competenze e così lo sforzo finanziario potrebbe essere compensato dalla commercializzazione di servizi verso l'industria mondiale degli SMR, in particolare per quanto riguarda la realizzazione di campagne sperimentali sugli effetti termoidraulici ed il comportamento incidentale.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Il Politecnico di Milano ha portato avanti le proprie attività di ricerca sui generatori di vapore innovativi prendendo in considerazione tre importanti problematiche connesse al flusso in generatori di vapore (GV) a tubi elicoidali. Tali GV sono considerati di particolare interesse per i nuovi concetti di reattore perché le alte prestazioni di scambio termico permettono soluzioni estremamente compatte.

Il primo studio ha investigato l'influenza del rapporto tra il diametro interno dei tubi e il diametro di curvatura dei tubi stessi nell'insorgere del regime turbolento, con lo scopo di sviluppare una semplice correlazione che esprima la transizione tra flusso laminare e turbolento in tubi elicoidali. Per conseguire questo risultato si è seguito un approccio sperimentale basato sul fattore di attrito di Darcy, analizzando l'errore relativo tra i dati sperimentali e due correlazioni per flusso laminare e turbolento ricavando i rispettivi fattori di attrito con le equazioni di Ito. A questo scopo sono stati utilizzati dati sperimentali corrispondenti a 13 diversi rapporti tra il diametro interno dei tubi ed il diametro di curvatura dei tubi. I dati sperimentali sono stati prodotti su 12 test section testate al Politecnico di Milano (rapporto da 6,9 a 369) e su una test section testata sulla facility in SIET (rapporto pari a 79,80). Uno studio dettagliato del profilo del fattore di attrito ha messo in luce l'importante effetto dei parametri geometrici nel determinare l'inizio e la fine della zona di transizione. La correlazione che meglio ha riprodotto l'insorgere del regime turbolento in funzione del rapporto di curvatura è basata su un fitting lineare che è consistente per valori del rapporto di curvatura tendente all'infinito e mostra minori scostamenti dai dati sperimentali. La fine della zona di transizione è stata determinata come il punto di intersezione tra i profili sperimentali e l'equazione di Ito per flusso turbolento. In questo caso il fitting lineare presenta un campo di applicabilità limitato.

Il secondo studio effettuato ha riguardato l'effetto della potenza termica nei tubi sulla componente della perdita di pressione dovuta all'attrito. Questo studio è stato reso possibile dal data set costituito dai risultati dei test condotti nelle annualità precedenti dell'AdP sulla facility in SIET in condizioni adiabatiche (potenza minima per compensare le perdite di calore) e con riscaldamento lungo la test section. La differenza tra condizioni adiabatiche e diabatiche non è facilmente interpretabile poiché varia fortemente con la qualità del vapore ed è fortemente influenzata dal flusso di massa. Per questo motivo non è stato possibile determinare una legge che governi questo fenomeno. I risultati evidenziano l'influenza del flusso di massa nella fenomenologia ma non permettono di trarre delle conclusioni quantitative.

Per finire, è stato effettuato un tentativo di comprendere alcuni aspetti del comportamento idrodinamico di un flusso bifase acqua-vapore in tubi elicoidali, prestando particolare attenzione alla perdita di pressione ed all'attrito. Questa problematica è stata investigata attraverso simulazioni numeriche tridimensionali realizzate con FLUENT 1.4, il più popolare dei software commerciali CFD. FLUENT fornisce soluzione delle equazioni di bilancio utilizzando l'approccio a volumi finiti: le equazioni di trasporto sono integrate su ogni volume finito come definito dalla griglia mentre si assume un valore medio della variabile trasportata su tutto il volume. Con GAMBIT 2.4.6, il preprocessore di Fluent, si è generata una magliatura appropriata a ricostruire le esatte caratteristiche di una piccola porzione della facility a tubi elicoidali della SIET. Una serie di simulazioni è stata effettuata con questo modello per esaminare il comportamento della miscela bifase a diversi valori di qualità del vapore in condizioni adiabatiche. I risultati per le perdite di pressione sono stati confrontati con i dati sperimentali ottenuti sulla facility della SIET trovando un buon accordo e validando così l'approccio utilizzato per la simulazione. Per completezza è stata condotta anche un'analisi dell'attrito alla parete che ha prodotto una spiegazione fisica della presenza di un massimo nella curva della perdita di pressione per attrito in funzione della qualità del vapore.

Politecnico di Torino

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Per la messa a punto di uno Spool Piece (SP) per la misura della portata bifase il Politecnico di Torino ha effettuato la caratterizzazione di una configurazione in cui la sonda ECP è accoppiata ad un venturimetro. Questa scelta è coerente con le attività effettuate negli ultimi anni dedicate allo sviluppo di uno SP composto da soli due

strumenti, con il vantaggio di ridurre le lunghezze richieste e ovviamente i costi e la complessità dell'installazione. Lo svantaggio che si ha nel ridurre il numero degli strumenti è la necessità di sopperire alle informazioni mancanti tramite modelli e correlazioni empiriche o teoriche. Nella configurazione oggetto del presente studio il Venturi, non avendo parti in movimento ed essendo caratterizzato da un'elevata robustezza, ben si presta a lavorare nelle condizioni fluidodinamiche che l'impianto sperimentale SPES3 dovrà simulare, mentre il misuratore di grado di vuoto (ECP) dovrebbe consentire la ricostruzione della distribuzione delle fasi all'interno del condotto e di ottenere, oltre che il valore medio della frazione di vuoto di gas/vapore, altri importanti parametri fluidodinamici, utili per l'interpretazione del segnale del Venturi. La caratterizzazione dello Spool Piece è stata effettuata installando il dispositivo in un condotto verticale interessato da una miscela aria-acqua in deflusso anulare e anulare disperso. I modelli interpretativi dei segnali dei singoli strumenti sono stati analizzati ed adattati al fine di sviluppare una metodologia di analisi dei segnali che possa caratterizzare il deflusso bifase in termini di portate delle singole fasi e identificare le caratteristiche del deflusso.

La sonda ECP è stata caratterizzata tramite un modello numerico agli elementi finiti che ha permesso di determinare la dipendenza della capacità elettrica misurata dai vari elettrodi al variare dei parametri caratteristici del deflusso bifase anulare: spessore del film e grado di vuoto del core. Il confronto tra risultati del modello numerico e i dati sperimentali ha mostrato la necessità di utilizzare sia il modello fluidodinamico, che descrive la distribuzione locale delle fasi, sia il modello numerico per interpretare i segnali dello strumento e ricavare le grandezze di interesse. L'analisi dei dati sperimentali ha inoltre mostrato che il segnale della sonda è influenzato da capacità/impedenze parassite aggiuntive che devono essere eliminate o tenute in debita considerazione nello sviluppo di un modello dello strumento.

Per quanto riguarda il Venturi, l'analisi dei dati sperimentali ha mostrato la possibilità di utilizzare la misura delle cadute di pressione irreversibili (misura tra sezione di ingresso e di uscita dello strumento) congiuntamente alla misura di caduta di pressione tra ingresso e sezione ristretta, per ricavare le portate delle due fasi. L'analisi dei dati ha infatti mostrato che le cadute di pressione irreversibili dipendono fortemente dalla velocità superficiale del liquido. La conoscenza dei segnali relativi alle due cadute di pressione, insieme ai valori di pressione e temperatura, hanno quindi permesso di sviluppare un modello dello strumento che consente di calcolare la portata di aria e acqua con un errore massimo rispettivamente del 2 e del 30%. Nel secondo approccio proposto le portate delle due fasi vengono stimate sulla base del modello del Venturi che richiede la conoscenza del coefficiente di scarico bifase dello strumento e della densità bifase. L'analisi ha evidenziato che la conoscenza del grado di vuoto volumetrico nella test section (necessaria per la stima dei parametri del modello) non consente di ridurre gli errori sulla stima delle portate.

Come evidenziato dall'analisi numerica della sonda ECP e dalla modellizzazione della risposta del Venturi, la conoscenza della topologia del deflusso risulta essere fondamentale per l'interpretazione dei segnali. La conoscenza delle grandezze locali è dunque necessaria per ridurre gli errori di stima delle portate. In particolare si riscontra la necessità di misurare il grado di vuoto in ingresso, nella sezione ristretta e in uscita del Venturimetro. La conoscenza di queste grandezze consentirebbe di ridurre ulteriormente l'incertezza sui risultati, grazie alla possibilità di implementare all'interno del modello dello SP, correlazioni e modelli fluidodinamici sviluppati per specifiche topologie di deflusso.

Università di Palermo

c.1 Studi per il completamento della facility SPES3 presso la SIET

Il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo ha messo a punto la nodalizzazione TRACE, che simula il circuito primario, il circuito secondario ed il contenimento dell'impianto sperimentale SPES-3. Tale nodalizzazione è stata poi utilizzata per simulare il transitorio di SBO. Lo studio dei risultati ottenuti ha permesso di comprendere a fondo il comportamento dell'impianto e la risposta che esso avrebbe di fronte ad un evento simile. Non sono stati riscontrati punti critici che potrebbero mettere in crisi la struttura dal punto di vista termoidraulico. Tali risultati sono poi stati confrontati con quelli ottenuti nella simulazione RELAP dello stesso transitorio.

Università di Pisa

a.3 Calcoli e validazioni relativi ai codici di calcolo specifici per l'analisi degli incidenti gravi

Dopo aver raffinato un precedente modello sviluppato per il codice MELCOR v. 1.8.6 dell'impianto Mille600, in modo che potesse simulare la fase ex-vessel di un incidente severo, l'Università di Pisa ha prodotto i risultati relativi a due diverse sequenze incidentali, aventi entrambe come evento iniziatore la perdita totale dell'alimentazione elettrica. Nella prima sequenza si è considerata la possibilità di allagare la cavità del reattore per garantire la ritenzione all'interno del recipiente in pressione del corium fuso, mentre nella seconda si sono

analizzati i risultati predetti dal codice nel caso di rottura catastrofica del vessel e successivo allagamento della zona del contenimento nella quale il materiale fuso viene fatto diffondere.

Sebbene in entrambi i casi il codice MELCOR predica un'efficace mantenimento in condizioni di sicurezza del corium fuso all'interno del quale continua a prodursi calore di decadimento e vengono a trovarsi ancora significative quantità di prodotti di fissione, il lavoro ha permesso fondamentalmente di indagare le capacità operative della combinazione codice-utilizzatore nella simulazione di un incidente severo in un impianto preso a riferimento, con una particolare attenzione all'analisi dei risultati predetti da un codice complesso quale MELCOR a fronte di diverse strategie di gestione di una sequenza incidentale severa.

b.2 Metodologie di analisi degli eventi esterni e stima del rischio

L'Università di Pisa ha collaborato a stretto contatto con personale ENEA e il suo contributo è fortemente connesso a quello prodotto da quest'ultima. Si è affrontata la valutazione del rischio da impianti nucleari a seguito di incidenti provocati da eventi esterni, come emerso dall'incidente di Fukushima: a questo scopo si è seguito l'approccio tipo "Risk-informed". Un tale approccio implica che le conoscenze legate al rischio in esame siano usate come integratore delle informazioni deterministiche a fini decisionali sulla sicurezza. In questa prospettiva, si prevede l'utilizzo di tecniche di valutazione dei rischi per portare a un miglioramento della sicurezza e una più razionale allocazione delle risorse disponibili.

D'altra parte, si riconosce che, per quanto vengano implementati nuovi strumenti, alcuni problemi aperti restano ancora da affrontare e da elaborare convenientemente. Per esempio, affinché il processo di "risk-informed decision making" sia efficiente, è obbligatorio procedere ad una rappresentazione adeguata e al trattamento delle incertezze che riguardano sia le analisi di sicurezza deterministiche, sia le valutazioni dei rischi.

Sono stati affrontati i principali nodi legati al rapporto tra PSA e DSA proponendo come casi di studio alcune applicazioni pilota significative, nella forma di definizione della sequenza dell'incidente e valutazione del rischio associato. In particolare, il LOOP / SBO (Loss Of Offsite Power/Station BlackOut) causato da eventi esterni, come tifoni e tornado, è analizzato sia dal punto di vista deterministico, sia probabilistico.

La revisione globale del trattamento della perdita di alimentazione nel PRA (Probabilistic risk analysis), ha permesso di individuare alcuni problemi tecnici e di orientamento per l'implementazione dell'analisi probabilistica. Con riferimento invece alla DSA, un approccio metodologico numerico è stato adottato per "quantificare" il margine di sicurezza di un reattore ad acqua bollente (BWR) a struttura semplificata, secondo i requisiti degli stress tests. Il trattamento ha permesso di simulare, con una buona affidabilità, gli effetti dell'impatto delle onde (in termini di valori di pressione, calcolati in accordo alle regole ASCE-SEI).

Sono quindi state valutate le prestazioni complessive dell'impianto, considerando le ipotesi di sistemi di sicurezza non funzionanti, impianto isolato e sottoposto a station black-out. I risultati preliminari ottenuti hanno evidenziato che i valori di sollecitazione risultanti sono stati localizzati nella regione di contenimento sottoposta all'impatto dell'acqua. Il calcestruzzo è stato posto sotto compressione in conseguenza dell'impatto delle onde, mentre lontano da questa parte della superficie esterna dell'edificio di contenimento (in direzione longitudinale e circonferenziale) sono state osservate delle tensioni provocate da trazione, principalmente a causa dello sviluppo di rigonfiamenti nella zona circostante.

Anche se l'edificio di contenimento soffre elevati valori di stress localizzati e sembra avvengano danni ai materiali, in particolare nel caso di alta BFE, nessuna perdita di integrità strutturale si è verificata.

In conclusione, sono necessari ulteriori sviluppi per analizzare a fondo gli aspetti del comportamento idrodinamico delle onde (quali l'influenza della forma dell'edificio, onde secondarie, ecc), al fine di valutare correttamente le prestazioni dell'edificio di contenimento, sotto forma di spostamenti e stress, al fine di determinare le curve di fragilità del sistema di contenimento dell'impianto, che è l'obiettivo principale della analisi di tipo IDPSA (Integrated Deterministic-Probabilistic Safety Analysis).

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Lo studio realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione (DIMNP) dell'Università di Pisa si è rivolto, in continuità con le attività svolte nei precedenti PAR, alle problematiche di miscelamento del boro nel fondo vessel. Un'approfondita conoscenza di questo fenomeno è necessaria per accertare l'affidabilità dei sistemi basati sull'iniezione di boro, utilizzati in diversi progetti per la ridondanza e diversificazione dello spegnimento del reattore in progetti innovativi. Infatti in certe condizioni operative o incidentali la formazione di un pennacchio di fluido a bassa concentrazione di boro nel primario potrebbe indurre un'inserzione di reattività positiva in caso di ingresso nel nocciolo.

La metodologia adottata per studiare la fenomenologia legata al miscelamento del boro nel fondo vessel di un PWR si basa sulla combinazione tra metodi sperimentali e numerici:

- esperimenti effettuati su un modello scalato del reattore;
- uso di tecniche CFD validate sui dati sperimentali per studiare le problematiche a scala reale.

Gli esperimenti sono stati condotti sul mock-up che simula il downcomer e il lower plenum di un PRW SMR in scala 1/5 per e realizzato nell'ambito dei PAR precedenti al DIMNP. Tenendo conto dei limiti individuati nelle precedenti campagne sperimentali, sono stati condotti 7 nuovi test, con iniezione di acqua tiepida (42-48 °C) a diverse portate attraverso i SG ed iniezione di acqua sufficientemente fredda (11-13 °C) a portata costante attraverso le linee DVI (Direct Vessel Injection). L'aumento della differenza di temperature tra le due iniezioni ha permesso di ottenere dati sperimentali più significativi che i precedenti. L'analisi CFD è stata realizzata con il codice commerciale FLUID in cui modello è stato raffinato per una realistica rappresentazione del dominio di calcolo. Inoltre è stato calibrato il coefficiente adottato per simulare le perdite di pressione concentrate sul piatto all'ingresso del fondo vessel cilindrico (porous jump coefficient) per ottenere una stima migliore.

Le simulazioni condotte mostrano l'influenza sulla velocità dei vortici generati dall'iniezione di acqua fredda in prossimità dell'ingresso al core; l'effetto è di deflettere radialmente il flusso aumentando la componente radiale del campo di velocità in queste regioni. Questa distribuzione causa un profilo ad "U" della distribuzione di temperatura nella stessa regione. Un'altra conclusione evidente sia dai dati sperimentali che dalle simulazioni riguarda la presenza di un'inevitabile stratificazione termica tra i due fluidi a diverse temperature favorita in particolare dalla geometria del downcomer. Nonostante il codice riproduca in modo ragionevole i fenomeni che avvengono durante i transitori di miscelamento termico nel downcomer alcune differenze con i dati sperimentali sono ancora presenti e richiedono ulteriori investigazioni.

Università di Roma Sapienza

b.1 Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o di pre-emergenza

L'attività ha avuto lo scopo di fare il punto sullo stato dell'arte della simulazione degli incidenti severi per un reattore di tipo PWR a tre loop, del quale è stata studiata una nodalizzazione semplificata ma esaustiva, che permette di ottenere risultati in tempi molto brevi. Si è fatto uso del codice integrale MELCOR ver.1.8.6. Il transitorio analizzato prevede una perdita completa dell'alimentazione elettrica interna ed esterna, che comporta anche una perdita del pozzo termico, con assenza di perdita di refrigerante. Questo porta ad una fusione del nocciolo, con fuoriuscita del corium nella reactor cavity e conseguente reazione con il calcestruzzo. Il termine di sorgente risultante è comparabile con quanto reperibile in letteratura per transitori analoghi.

Il presente studio ha permesso di analizzare il transitorio di LTSBO di un reattore PWR e di valutare il termine di sorgente che, accoppiato al codice MACCS2, potrebbe permettere di predire la dose alla popolazione. Il contributo dell'Università di Roma è stato conforme agli obiettivi prefissati per l'attuale annualità, permettendo di sviluppare una metodologia da considerare come base per studiare la maggior parte dei transitori di cui tener conto nel tipo di impianto analizzato. Tali transitori, pur presentando alcune peculiarità differenti, possono essere generalmente simulati cambiando la nodalizzazione di qualche specifico componente.

b.3 Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi

Le attività svolte nella task si focalizzano sul confronto della risposta dei sistemi di sicurezza attivi e passivi a fronte di sequenze incidentali, relativamente a reattori avanzati di prossima generazione. In particolare, sono stati presi in conto, analizzati e confrontati sistemi di sicurezza attivi e passivi che svolgono la stessa funzione di sicurezza, come lo smaltimento del calore residuo e lo spegnimento del reattore.

Il confronto si è sviluppato con riferimento in termini di prestazioni ed affidabilità. Il medesimo confronto è stato effettuato a livello di sequenze incidentali, in termini di adeguatezza relativamente alle azioni in risposta a determinati eventi iniziatori.

Università di Padova

a.4 Metodi per valutazioni di sostenibilità

Il lavoro condotto dall'Università di Padova riguarda uno studio sviluppato nell'ottica di valutare le implicazioni tecnico-economiche delle attuali politiche energetiche tese a favorire la penetrazione di fonti rinnovabili nei mix di generazione. E' stato analizzato nel dettaglio uno scenario italiano al 2030 in cui il 50% della domanda finale sia generata da fonti rinnovabili (tutte le analisi sono quindi soggette alle inevitabili incertezze dovute alla previsione dei costi).

Le tecnologie di generazione FER sono state raggruppate in tre macro categorie e, in base ai rispettivi contributi nel mix di generazione, variabili da 0 al 50%, sono stati delineati 21 scenari. Per facilitare la valutazione del livello di fattibilità tecnico-economica di ognuno di essi, i valori del costo medio dell'energia di ogni scenario sono stati riportati su un grafico triangolare, potendo così determinare le curve di "iso-costo".

L'area del triangolo corrispondente agli scenari a minore costo (9,5- 9,7 c€/kWh) corrisponde ad una penetrazione eolica compresa tra il 20 ed il 30%, un contributo da FV tra lo 0 e il 20% ed, infine, tra il 10 e il 30% da "altro". Tuttavia risulta alquanto improbabile che scenari di questo tipo possano essere realizzabili poiché richiederebbero l'installazione di una potenza eolica superiore al limite per l'Italia, stimato in base alla morfologia del territorio e la ventosità dei siti.

Per raggiungere una quota di generazione da rinnovabili pari al 50%, rispettando i potenziali di generazione per le singole fonti, è pertanto necessario installare una notevole potenza fotovoltaica. Ciò implica però difficoltà di gestione della rete in primavera ed estate a causa del superamento della produzione rispetto alla domanda elettrica, con conseguente necessità di utilizzo di sistemi di accumulo. Questa opzione comporta costi di generazione pari a circa 11 c€/kWh. Una riduzione di ~1 c€/kWh del costo medio di generazione può essere ottenuta sostituendo parte della produzione da FV e accumulo con biomasse, anche da importazione.

Università di Bologna

a.3 Calcoli e validazioni relativi ai codici di calcolo specifici per l'analisi degli incidenti gravi

Diversi fenomeni possono minacciare la funzione di contenimento e il comportamento dei prodotti di fissione durante gli incidenti gravi. È importante capire e essere in grado di prevedere questi fenomeni se le loro conseguenze indesiderate sono da evitare o ridurre al minimo. Importanti progressi sono stati compiuti negli ultimi dieci anni e per la maggior parte dei problemi può essere considerato che ulteriori ricerche non modificheranno radicalmente il quadro delle conoscenze. L'abilità di includere condizioni di incidente grave nella progettazione e gestione degli impianti, nello sviluppo della gestione degli incidenti gravi, nelle strategie di mitigazione degli incidenti e in attività di formazione, è stata migliorata notevolmente negli ultimi anni, come sono stati completati numerosi programmi di ricerca sugli incidenti gravi e anche i codici sono stati validati per un certo numero di sequenze incidentali rilevanti.

A dispetto di quanto fino a qui detto, esiste un anello debole della catena. Esso va visto nella formazione sistematica degli analisti affinché siano in grado di studiare e valutare al meglio l'evoluzione di incidenti gravi e di usare i relativi codici di calcolo.

Il contributo dell'Università di Bologna è stato quello di simulare uno scenario di incidente grave in un reattore ad acqua pressurizzata (PWR) per mezzo del codice ASTEC al fine di indagare le potenzialità offerte dal codice attraverso un calcolo integrale. Tale approccio ha permesso di considerare la complessità dei fenomeni coinvolti le cui possibili interazioni tra loro costituiscono un contenuto innovativo nell'ambito dell'analisi di sicurezza dei reattori nucleari.

b.1 Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o di pre-emergenza

In questa task l'Università di Bologna ha collaborato a stretto contatto con ENEA. Si è affrontata la realizzazione di un database contenente specifici parametri d'impianto e gli inventari di nocciolo di 26 centrali frontaliere (distanti meno di 200 km dall'Italia). Si è inoltre provveduto all'individuazione di un procedimento generale in grado di fornire una stima della densità media del moderatore e dell'arricchimento medio del nocciolo. Il lavoro relativo all'attuale annualità si è concluso realizzando un confronto tra gli inventari di combustibile per un assembly Westinghouse 17x17 calcolati con l'uso dei codici MCNPX 2.7.0 e ORIGEN-ARP.

LINEA PROGETTUALE 2: COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE PER IL NUCLEARE DI IV GENERAZIONE

Politecnico di Milano

a.3 Analisi di sicurezza

Il Politecnico di Milano, relativamente agli studi analitici su combustibili per reattori veloci refrigerati a metallo liquido, ha contribuito alla modellazione dei fenomeni accoppiati di rigonfiamento gassoso e rilascio di gas di fissione in combustibili nucleari a base di ossidi, con applicazione all'analisi termo-meccanica integrale (e, in definitiva, alla progettazione e al licensing) delle barrette di combustibile. Il lavoro ha visto lo sviluppo di un nuovo modello integrato per i suddetti fenomeni, fondato su un approccio ingegneristico orientato al compromesso pratico tra una descrizione fisica e i requisiti computazionali inerenti all'analisi integrale di barretta. Il modello è

stato implementato con successo nel codice di performance TRANSURANUS e validato tramite confronto dei risultati con un ampio database sperimentale.

Inoltre, è stata condotta una revisione critica degli approcci attualmente adottati in letteratura e nei codici di performance per la modellazione del rilascio dei gas di fissione e dell'elio in combustibili MOX, focalizzandosi in particolare sulle problematiche dovute al rilascio di elio.

a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione

ENEA e Politecnico di Milano, relativamente alla gestione del combustibile nucleare esausto, hanno effettuato una accurata indagine al fine di stabilire lo stato dell'arte circa le tecniche di riprocessamento sperimentate con successo (idrometallurgia) e quelle ancora in fase di studio (pirometallurgia).

Il Politecnico di Milano ha inoltre proseguito sugli studi sull'interazione fuel-coolant in sistemi multicomponente, anche con approccio ad ab-initio, tipici degli scenari incidentali che portano alla degradazione del nocciolo e fessurazione della guaina. Il lavoro svolto ha permesso di ottenere importanti risultati e ha posto le basi affinché ricerche future possano approfondire l'interazione tra combustibile e termovettore in LFR.

b.1 Qualifica coating e materiali strutturali per sistemi LFR

Il Politecnico di Milano ha realizzato studi e prove sui processi di deposizione per ablazione laser o PLD (Pulsed Laser Deposition), che rappresenta una scelta alternativa ma molto promettente. Dopo una descrizione del processo di sintesi, nel lavoro si sono illustrati i risultati delle caratterizzazioni microstrutturale, morfologica e meccanica. Sono stati fabbricati dei rivestimenti di Al_2O_3 su substrato AISI 316L tramite ablazione laser a temperatura ambiente presso il Center for Nano Science and Technology dell'Istituto Italiano di Tecnologia. I campioni sono stati caratterizzati tramite XRD, SEM e prove di piega presso l'Università di Roma "Tor Vergata".

Per la completa caratterizzazione dei coating prodotti il Politecnico di Milano ha provveduto a progettare prove di irraggiamento con ioni pesanti di rivestimenti di allumina prodotti per ablazione laser da eseguire presso la piattaforma sperimentale JANNUS dei centri di ricerca CEA di Saclay (SRMP) e di Orsay (CSNSM).

Politecnico di Torino

a.2 Progettazione Nocciolo LFR

Relativamente agli studi di dinamica sui sistemi LFR e SMR, il Politecnico di Torino in collaborazione con ENEA, ha realizzato lo sviluppo di procedure per la generazione di una libreria dinamica di dati nucleari di base (sezioni d'urto) in funzione della temperatura, in vista del successivo accoppiamento della libreria medesima con la fase di calcolo dei transitori in sistemi LFR/ADS (e ADS SMR refrigerati a piombo).

Si sono determinate sezioni d'urto efficaci rappresentative delle diverse regioni necessarie alla modellazione del nocciolo di ALFRED a partire dalle librerie elementari di dati nucleari JEFF-3.1, e si è prodotto un set di sezioni d'urto, valutate a diverse temperature rappresentative delle condizioni di funzionamento nominale ed incidentali, per un loro successivo utilizzo in codici di dinamica tridimensionale di nocciolo.

Ancora il Politecnico di Torino, con il supporto ENEA, ha proceduto all'ulteriore validazione del codice FRENETIC. In particolare il modulo termoidraulico è stato ulteriormente testato. A causa dell'indisponibilità di dati sperimentali relativi a prove condotte su strutture a più elementi in ambiente di piombo liquido, si è deciso di procedere alla validazione per confronto con i risultati di simulazioni eseguite per mezzo del già validato codice di sistema RELAP5-3D[®] nell'ambito di un esercizio di benchmark internazionale condotto sui dati delle prove di fine vita eseguite sul reattore americano EBR-II, refrigerato a sodio.

Con riferimento ad una geometria semplificata del nocciolo di EBR-II, sono state prese in considerazione due condizioni incidentali di tipico interesse per le future applicazioni del codice FRENETIC: la completa perdita di circolazione forzata del refrigerante attraverso il nocciolo (complete loss of flow) e il grippaggio di una delle pompe primarie del reattore. Tali scenari sono stati selezionati, tra i molti possibili, per le condizioni di forte disuniformità di flusso implicate nel nocciolo: nel primo caso, una quasi omogeneizzazione delle portate attraverso elementi con forti differenze di generazione di potenza; nel secondo caso, una combinazione di asimmetrie di flusso e generazione di potenza.

I risultati delle analisi mostrano un accordo incoraggiante tra FRENETIC e RELAP5-3D[®], suggerendo la possibilità di utilizzare efficacemente il codice FRENETIC per analisi dinamiche tridimensionali di nocciolo.

a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione

Politecnico di Torino ed ENEA hanno svolto congiuntamente una review relativa ai sistemi di abbattimento degli off-gas.

Relativamente agli studi sulle iterazioni di gas di fissione e refrigerante il lavoro, congiunto Politecnico di Torino ed ENEA, si è delineato su due linee di intervento. Da una parte è stato rivisto il progetto di una apparecchiatura sperimentale presentato nel precedente piano annuale di realizzazione, considerando gli studi ed i risultati emersi nel progetto Europeo FBRIDGE. Dall'altra parte si è svolta un'attività sperimentale sull'impianto OGATA (Off-Gas Treatment Apparatus), presso il C.R. ENEA Casaccia.

Università di Palermo

a.3 Analisi di sicurezza

L'Università di Palermo ha contribuito allo sviluppo e alla qualifica di codici e metodi per l'analisi di sicurezza di reattori di IV generazione refrigerati a metalli liquidi. Sono stati realizzati due modelli RELAP5-3D di reattori veloci a piscina refrigerati a metallo liquido: CP-ESFR ed EBR-II. La prima nodalizzazione relativamente semplice e fast running sarà portata a termine attraverso l'uso dei dati neutronici d'impianti calcolati nell'ambito dello stesso lavoro. La seconda nodalizzazione, molto dettagliata e complessa, fa uso di componenti tridimensionali e sarà utilizzata nell'ambito del progetto IAEA Coordinated Research Project (CRP) on EBR-II Shutdown Heat Removal Tests (SHRT).

Inoltre è stata studiata l'applicabilità degli attuali codici termoidraulici di sistema per l'analisi di sicurezza di reattori di IV generazione refrigerati a metalli liquidi (piombo e sodio).

Università di Pisa

a.3 Analisi di sicurezza

Università di Pisa in collaborazione con ENEA ha provveduto alla validazione del codice TRANSURANUS versione 2012 nel simulare il comportamento di combustibili tipo MOX assoggettato sia a "normal conditions" che "power ramps". Particolare enfasi è data alle principali variabili che influenzano il fenomeno del "Fission Gas Release".

Ancora Università di Pisa in collaborazione con ENEA ha verificato la capacità del codice nel predire il comportamento del combustibile tipo MOX sviluppato appositamente per reattori tipo "Fast Breeder (a sodio)" in condizioni di tipo DBA (Design Basis Accident). Particolare enfasi è data alle principali variabili che influenzano la simulazione del profilo di temperature nel combustibile ed i fenomeni ad esso connessi durante le escursioni di potenza fino al principio di fusione sulla base dell'esperimento HEDL-P-19.

L'Università di Pisa ha inoltre svolto studi di "core compaction". Lo studio è stato articolato in:

- 1) revisione dello state dell'arte;
- 2) sviluppo di una metodologia deterministica, mediante l'implementazione di modelli 3D delle principali strutture caratterizzanti il reattore.
- 3) valutazione preliminare delle deformazioni indotte nel "core region" dai fenomeni dinamici.

La metodologia sviluppata si basa sull'approccio delle sottostrutture e fa riferimento agli effetti indotti dal terremoto base di progetto: questo evento incidentale è stato preso in esame poiché, come indicato anche in letteratura, è quello più pericoloso in relazione alle deformazioni che i carichi sismici possono causare sui sistemi, strutture e componenti del NPP, in particolar modo nei reattori a metallo liquido, che sono caratterizzati da elevate forze d'inerzia.

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Per quanto riguarda gli studi sull'accoppiamento dei codici di calcolo, Università di Pisa (GRNSPG) ha seguito la strategia di sviluppo definita nel PAR 2011, con l'obiettivo generale di mettere a uno strumento di accoppiamento tra codici CFD e di sistema, e con i seguenti obiettivi specifici:

- migliorare il metodo numerico di accoppiamento, con particolare riferimento alle caratteristiche di robustezza, stabilità, efficienza;
- investigare l'influenza di parametri di "sensibilità" precedentemente identificati;
- sviluppare una interfaccia grafica per l'Utente, che consenta un'utilizzazione più intuitiva ed efficiente dello strumento di accoppiamento;
- estendere la base di verifica e validazione (V&V).

Come risultato dell'attività svolta, è stato dunque ottenuto uno strumento di accoppiamento, dotato di interfaccia grafica, basato su un'architettura numerica che è stata oggetto di successive fasi di miglioramento. Tale strumento è stato sottoposto a diversi "test" di varia complessità (attività di V&V) e, nei limiti di applicabilità definiti dai test effettuati, risulta efficacemente utilizzabile.

In parallelo, L'Università di Pisa ha svolto un lavoro che ha visto l'accoppiamento del codice di sistema RELAP5 con il codice CFD FLUENT. In particolare si è provveduto ad una analisi di post-test sia dei risultati sperimentali ottenuti con la facility NACIE, sia con quelli ottenuti con la facility CIRCE in configurazione DHR. I risultati ottenuti dal codice RELAP5 (calcoli stand alone), e dall'accoppiamento RELAP5-FLUENT sono poi stati confrontati con i dati sperimentali disponibili.

Università di Roma "Sapienza"

a.1 Progettazione di Sistema

L'Università di Roma Sapienza, in collaborazione con ENEA ha realizzato studi orientati alla valutazione dello stato dell'arte e delle prospettive di sviluppo dei principali reattori della IV Generazione, con particolare riferimento alla sostenibilità dei sistemi LFR e SMR veloci refrigerati a piombo.

Si è valutata la sostenibilità della filiera di IV generazione LFR, nell'ambito di uno scenario energetico sviluppato in una serie di Paesi dell'Europa del sud-est, allargando l'analisi all'Ucraina, includendo l'Italia e ipotizzando, per questa, un ritorno al nucleare con la realizzazione di nuovi impianti a partire dalla III generazione avanzata e LFR.

Per le situazioni di lavoro ipotizzate sono stati determinati i flussi di materiale (fabbisogno di uranio naturale, SWU per l'arricchimento, accumulo di plutonio e attinidi minori) e i mix dei reattori (PHWR, LWR e LFR) determinati secondo criteri di ottimizzazione e calcolati con il codice MESSAGE della IAEA.

I risultati ottenuti confermano i benefici sulla sostenibilità del sistema nucleare regionale in termini di diminuzione del consumo di uranio naturale e in termini di eliminazione dello stock di plutonio prodotto dai reattori ad acqua.

a.2 Progettazione Nocciolo LFR

L'Università di Roma in collaborazione con ENEA, ha implementato studi sull'analisi di incertezze e rappresentatività di esperienze a potenza zero a supporto di sistemi critici e sottocritici (ADS) raffreddati a piombo, mediante l'applicazione della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) al caso della esperienza a potenza zero GUINEVERE con nocciolo caricato con combustibile metallico.

In particolare l'analisi è stata realizzata mediante le procedure GPT implementate nel codice ERANOS, focalizzandole sul comportamento degli indici spettrali fissioni Pu-239 / fissioni U-235, fissioni U-238 / fissioni U-235 e fissioni NP-237 / fissioni U-235 a seguito di una riduzione del 20%, localizzata o globale, della densità del piombo (GUINEVERE) o del piombo-bismuto (MYRRHA). I calcoli sono stati eseguiti modellando i due sistemi secondo geometrie 2D cilindriche (le sole geometrie che attualmente consentono il pieno utilizzo, nel codice ERANOS, della modalità GPT). Per ottenere i coefficienti di correlazione è stata usata la matrice di dispersione Bolna a 15 gruppi energetici. L'analisi ha fornito ottimi risultati, con valori dei coefficienti di correlazione elevati per tutti gli indici spettrali presi in considerazione, con particolare attenzione per quelli ad alta energia.

a.3 Analisi di sicurezza

L'Università di Roma in collaborazione con ENEA ha provveduto alla determinazione dei parametri di sicurezza del core e dell'andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido, attività che ha riguardato lo sviluppo e la validazione di un modello Monte Carlo basato sul codice MCNPX v.2.7 per la simulazione neutronica di un reattore veloce raffreddato a sodio. Tale modello è stato sviluppato seguendo le specifiche dell'OECD/NEA Sodium Task Force.

Si è inoltre realizzata un'analisi critica della strumentazione e dei sistemi di controllo di reattori al piombo già sviluppati o attualmente in fase di progettazione e sviluppo a livello internazionale. Il lavoro svolto rappresenta un passo preliminare ma ineludibile per lo sviluppo dei sistemi di strumentazione e controllo per reattori al piombo liquido.

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, ENEA e Università di Roma Sapienza hanno progettato e realizzato uno scambiatore di calore prototipo con tubi a baionetta a doppia parete (HERO - Heavy liquid metal - pressurized water cooled tube) da installare nella facility CIRCE presso il C.R. Brasimone.

Lo scopo di HERO è quello di verificare la fabbricabilità dei tubi del generatore di vapore dell'impianto prototipico ALFRED (LFR), oltretutto di caratterizzarne le performance di scambio termico, verificandone la temperatura di uscita del vapore surriscaldato.

Università di Bologna

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Relativamente allo sviluppo del codice multiscala agli elementi finiti FEM-LCORE, presso l'Università di Bologna è proseguito lo sviluppo di moduli tridimensionali e monodimensionali di tipo CDF e CFD-poroso.

Università di Roma Tor Vergata e CSM SpA

b.1 Qualifica coating e materiali strutturali per sistemi LFR

In continuità con il precedente Piano Annuale di Realizzazione, CSM Spa e Università di Tor Vergata, sotto la supervisione ENEA, hanno provveduto alla selezione e alla deposizione di rivestimenti per la protezione dei materiali strutturali operanti in piombo.

Nell'ambito del lavoro sono stati riportati, descritti e discussi i risultati relativi alla realizzazione e alla successiva caratterizzazione microstrutturale, morfologica e meccanica di rivestimenti di FeAl, FeCrAl e Al₂O₃ propedeutici alla realizzazione di sistemi multistrato per la protezione degli acciai dalla corrosione da metalli liquidi pesanti. In continuità e ad integrazione dell'attività svolta in precedenza, per la deposizione del sistema multilayer sono state selezionate tecnologie di deposizione PVD. In particolare, nella attività sperimentale svolta è stato utilizzato il processo RF magnetron sputtering per la deposizione del top layer, tecnologia adatta alla deposizione di film di ossido, mentre i rivestimenti metallici dell'interlayer e dell'adhesion layer sono stati prodotti con la tecnologia arco. I rivestimenti sono stati oggetto di un'ampia e completa campagna sperimentale di caratterizzazione principalmente volta a investigare la natura dei rivestimenti prodotti, la loro morfologia, microstruttura e adesione al substrato. I campioni forniti sono stati sottoposti a misure di diffrazione a raggi X, osservazione al microscopio elettronico a scansione per investigare la morfologia, l'omogeneità, e stimarne lo spessore; microanalisi di spettroscopia a dispersione di energia per valutare qualitativamente la composizione chimica e la distribuzione degli elementi costituenti, test di flessione (bending) a tre punti per stimarne l'adesione al substrato.

SIET SpA

Le attività della SIET sono state svolte all'interno della Linea Progettuale 1 "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare".

c.1 Studi per il completamento della facility SPES3 presso la SIET

L'attività svolta dalla SIET nell'ambito di questa task ha consistito nell'elaborare un dettagliato piano economico per le attività e approvvigionamenti ancora da completare, valutando diverse ipotesi di intervento, ivi comprese le possibili collaborazioni con l'industria del settore che si è dichiarata disponibile a partecipare al progetto al fine di mantenere la visibilità nel mercato internazionale.

Il Progetto SPES-3 ha oggi raggiunto un grado di avanzamento molto importante essendo state completate le seguenti principali attività: progettazione di tutti i sistemi della facility, opere di predisposizione del sito, realizzazione della struttura portante, costruzione ed installazione di tutti i componenti del sistema "contenimento", costruzione ed installazione dei sistemi di emergenza, approvvigionamento ed installazione di componenti del sistema di alimentazione elettrica di potenza e del sistema di controllo, prove di qualificazione di prototipi di barre riscaldanti impiegate per la simulazione degli elementi di combustibile e prove di sviluppo di strumentazione speciale per la misura di parametri dei fluidi bi-fase.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Nell'ambito di questa task in completa continuità con le attività svolte nei precedenti PAR, la SIET ha proceduto alla messa a punto finale dello "Spool Piece" per la misura della portata massica bifase nelle linee di rottura dell'impianto sperimentale SPES-3.

FN SPA

FN Spa ha collaborato con ENEA nell'ambito della LP2, Obiettivo B. In particolare ha assunto l'onere del task B2, "Studi ed esperienze sulla chimica del refrigerante e sulla fabbricazione di componenti prototipici", sotto la supervisione ENEA e con la collaborazione di Ansaldo Nucleare.

FN SPA, sulla base delle indicazioni di input da parte ENEA/Ansaldo Nucleare, ha condotto le attività di progettazione della griglia spaziatrice per la realizzazione del mock-up di elemento di combustibile per reattore LFR in geometria esagonale (tipo ALFRED).

Sono stati realizzati, dopo le varie fasi di studio, i disegni esecutivi delle 14 componenti della griglia, e si sono realizzate prove di fattibilità realizzando alcuni prototipi di componenti di griglia mediante foto – tranciatura chimica e successiva realizzazione di bugne e di uncini. Infine i prototipi di componenti di griglia sono stati assemblati su tubi (O.D. 10.5 mm), appositamente tagliati a misura e disposti secondo la geometria prevista dalla configurazione ALFRED.

Dalle prove effettuate sono state ricavate informazioni utili sia per un'ulteriore semplificazione della griglia nell'ottica dell'assemblaggio con guaine contenenti materiale radioattivo e delle problematiche che possono insorgere nell'atto del calettamento del fascio tubiero nel tubo esagonale, sia per quanto riguarda la sperimentazione di ulteriori prove circa i trattamenti da effettuare sui materiali base individuati per la griglia al fine di garantire la formabilità delle piegature/bugne e le caratteristiche meccaniche in temperatura che permettono di mantenere le barrette di combustibile nella loro posizione anche in presenza di piombo fuso.

La sperimentazione continua con la progettazione e realizzazione di un banco di assemblaggio e delle attrezzature necessarie per la realizzazione delle componenti di griglia a livello semi-industriale.

Attività di fisica della fusione complementari a ITER

Il programma fusione è coordinato a livello europeo dall'Euratom e vede la partecipazione di tutti i Paesi dell'Unione Europea più la Svizzera. Le attività italiane, sono condotte dall'ENEA, che ha la funzione di coordinatore, dal CNR e da molte istituzioni universitarie.

Gli studi sulla fusione termonucleare controllata hanno portato al progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO). ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto consentirà di verificare le tecnologie rilevanti per il reattore e fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO.

A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato "Broader Approach" (BA) destinato ad accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione. Il costo dell'accordo è ripartito in pari uguali fra EU e Giappone (JAEA). L'accordo è regolato da specifici "Agreement of Collaboration" con l'agenzia Europea Fusion for Energy che impegnano i vari paesi a fornire il proprio contributo.

L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, ed ad ENEA è stata affidata la costruzione, in collaborazione col suo omologo francese CEA, del magnete superconduttore di JT-60SA con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono:

- la realizzazione di un esperimento tipo tokamak denominato JT-60SA;
- la progettazione e la realizzazione di prototipi per la sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility);
- l'istituzione del centro di studi IFERC (International Fusion Energy Research Center).

Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi finanziari per forniture 'in kind'. L'offerta è stata fatta in considerazione del valore industriale e strategico di questo programma.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m (Figura 331), in grado di confinare un plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, in configurazioni elongate a D, con singolo o doppio nullo ed impulsi di 100 s ogni ora. JT-60SA sarà dotato di un sistema di manipolazione remota per consentire la manutenzione di componenti all'interno della camera da vuoto investiti da un flusso neutronico di 1.5×10^{21} neutroni/anno. L'accoppiamento con il plasma di 41 MW di potenza di riscaldamento con iniettori di neutri ed antenne a microonde alla ciclotronica elettronica permette di operare con alte densità di plasma e significativi valori di flusso di potenza sul divertore. L'isolamento termico di JT-60SA sarà assicurato, sotto vuoto, da un criostato metallico.

Il sistema magnetico di JT-60SA, è costituito di tre sottosistemi: i 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF) che opereranno prevalentemente in regime stazionario; i 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale (CS) in Nb₃Sn necessario per indurre la corrente nel plasma; infine i 6 magneti di forma toroidale in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma (EF).

Ciascun avvolgimento della bobina toroidale è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio.

Per la realizzazione della macchina JT-60SA l'ENEA è responsabile di:

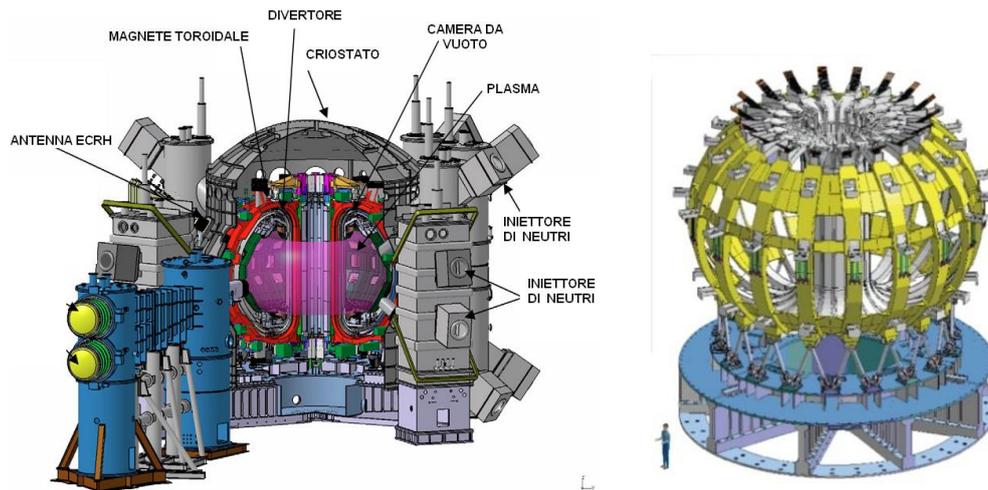


Figura 331. Vista assonometrica della macchina Tokamak JT-60SA e del sistema magnetico toroidale

- nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete; le altre nove saranno realizzate dal CEA Francese;
- le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico dotate di precisioni molto accurate per garantire il posizionamento finale delle bobine;
- quattro sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) con inserzione di un sistema variabile di resistenza;
- le alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente, e sei trasformatori.

La realizzazione delle nove bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale. Nel corso del 2013 sono state completati le qualifiche riguardanti tutti i processi speciali associati alla realizzazione dei doppi pancake. Sono state inoltre acquisite le attrezzature per l'inserimento degli avvolgimenti nelle casse di contenimento e relative impregnazioni finali, infine sono stati realizzati tutti i componenti del circuito di elio che verranno assemblati sui magneti prima delle loro prove finali e spedizione.

Attività di ricerca e sviluppo per IFMIF-EVEDA e IFERC

Queste attività richiedono lo sviluppo competenze e l'elaborazione di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi, in particolare per gli aspetti legati alla purificazione e alla corrosione/erosione del litio liquido, della manutenzione remota, dello sviluppo e caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di silicio (SiC/SiC). Questi settori sono di grande interesse per le attività programmatiche dell'ENEA che su questi temi è impegnata da tempo. In particolare le attività relative ai metalli liquidi e alla manutenzione remota potranno usufruire degli impianti presenti presso il Centro ENEA del Brasimone e della esperienza nella progettazione di circuiti a metallo liquido e della relativa manutenzione remota.

L'attività, infatti, consiste nella progettazione del target di IFMIF, un componente su cui fluisce litio liquido ad alta velocità, e delle attività di sviluppo e caratterizzazione a supporto, riguardanti la corrosione/erosione e la purificazione del litio e la dimostrazione delle operazioni di manutenzione remota.

Vengono effettuate sperimentazioni dedicate alla purificazione ed alla verifica della compatibilità chimica del litio con i materiali strutturali al fine di prevedere la durata dei componenti, il trasporto di massa relativo agli elementi principali (Fe, Cr e Ni), la loro deposizione ed il loro contributo di radio attivazione del sistema.

Poiché il target di IFMIF è soggetto ad un elevato danneggiamento neutronico, dell'ordine di 50 dpa/anno, una componente essenziale della progettazione è l'analisi delle sollecitazioni termomeccaniche conseguenti all'esposizione neutronica. Tale analisi deve essere eseguita in modo accurato al fine di predire la vita media delle parti più sollecitate e pianificarne il programma di sostituzione parziale o totale. Tale analisi richiede un significativo impegno in termini di calcolo numerico sia con codici Monte Carlo di neutronica e sia con codici F.E per la termica e la meccanica. In molti aspetti del calcolo è necessario ricorrere ad adattamenti ad hoc in quanto i codici commerciali non sono ancora adeguatamente configurati.

Nel campo dei compositi ceramici, grazie anche alla collaborazione in atto con la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, si hanno dotazioni impiantistiche di grande rilievo come il sistema di CVI (Chemical Vacuum Infiltration) per la realizzazione di componenti di carburo di silicio composito (SiC/SiC). Ai compositi ceramici si guarda con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche. Queste attività hanno una forte continuità con quanto in atto per lo sviluppo del reattore dimostrativo a fusione ma anche per i reattori a fissione di IV generazione.

Altre attività internazionali di accompagnamento ad Iter: FAST il nuovo esperimento satellite europeo

Obiettivo è la realizzazione di un esperimento di fusione denominato FAST di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER (la macchina tokamak che sarà costruita a Cadarache, Francia, frutto di una collaborazione internazionale tra Unione Europea, Cina, Giappone, Federazione Russa, India, Corea, USA). FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. Lo scopo è quello di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle alfa mediante ioni accelerati dai sistemi di riscaldamento ausiliario. In questo modo sarà possibile studiare un plasma che brucia senza ricorrere all'uso del trizio. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico, sviluppate in ENEA, e le scariche di lunga durata consentono di provare componenti in condizioni rilevanti per il funzionamento di ITER e DEMO.

Il progetto che riguarda la costruzione della macchina tokamak denominata FAST include la realizzazione di impianti per le alimentazioni elettriche, il riscaldamento del plasma con radiofrequenza (40 MW) e predisposta per l'utilizzo di iniezione di neutri, il raffreddamento con fluido criogenico (elio a 30 K) ed acqua. Sono incluse, inoltre, le diagnostiche per le misure dei parametri del plasma ed il sistema di controllo. A seconda del sito scelto, sarà necessario costruire nuovi edifici o adeguare quelli esistenti.

La simulazione di un plasma che brucia nelle condizioni di interesse reattoristico è un aspetto altamente innovativo del progetto. Ad oggi i parametri che caratterizzano questi regimi sono stati studiati singolarmente. Risulterebbe perciò, data l'alta non linearità dei fenomeni associati, un passo molto importante verso la piena comprensione del comportamento del plasma e contribuirebbe a rendere molto più proficua la sperimentazione di ITER. Inoltre, FAST consentirà di sviluppare nuove tecnologie avanzate per il reattore a fusione, quali quelle relative allo smaltimento degli altissimi flussi termici originati dal plasma.

All'interno dello sviluppo del progetto concettuale di FAST vengono analizzati in dettaglio alcune proprietà strutturali del sistema magnetico, le necessarie azioni per l'integrazione della potenza elettrica necessaria a far funzionare l'esperimento, e le principali necessità per il remote Handling della prima parete.

Il progetto si articola in quattro obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

a.1 Fornitura di 9 moduli di magnete di campo toroidale

Entro la fine del 2013 è previsto il completamento di 6 doppi pancake con la composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione. Questo obiettivo è stato preceduto da una complessa attività di ingegneria in supporto alle attività di qualifica dei processi speciali, e di progettazione e acquisizione delle attrezzature necessarie per il completamento dei magneti.

Sul lato di ingegneria, le attività svolte nel 2013 sono state dedicate alla stesura dei piani di controllo della qualità (QCP) per i processi di produzione, dei disegni costruttivi del circuito di elio e della mappa di saldatura delle casse di contenimento. Inoltre sono state sviluppate le specifiche tecniche per l'approvvigionamento delle numerose attrezzature necessarie nelle diverse fasi di lavorazione.

Riguardo ai QCP, è opportuno notare che, a causa della sua complessità, il progetto è stato accompagnato da un rigido sistema di garanzia della qualità. A questo scopo, dopo l'esperienza maturata nelle attività di qualifica, sono stati redatti i QCP per la produzione di serie. In particolare lo scorso anno sono stati prodotti i QCP per i giunti elettrici interni, per le terminazioni, per la saldatura dell'ingresso di Elio, per gli isolatori elettrici, dei DP e del WP di produzione. Sul lato delle qualifiche, il QCP per la saldatura trasversale della cassa sul mock-up è stato prodotto e impiegato durante le operazioni di qualifica nel corso del PAR 2012.

Per quanto riguarda le attività di disegno, dei 167 disegni esecutivi prodotti finora dall'inizio del contratto con ASG, 75 sono stati rilasciati da ottobre 2012 a settembre 2013 in revisione o per la prima volta. La necessità di revisione

è venuta dall'esperienza maturata nel programma di qualifica o a seguito di modifiche nel progetto complessivo della bobina originate prevalentemente da problemi di interfaccia con il resto dei componenti che verranno assemblati nel tokamak. A questo proposito, particolare attenzione è stata dedicata alla progettazione del circuito di elio che verrà installato sulle bobine all'ultimo atto della produzione e che serve per alimentare l'elio dentro i cavi superconduttori per il loro raffreddamento (Figura 332). Menzione speciale merita il disegno contenente la mappa di saldatura della cassa. Questo disegno riassume tutta l'esperienza acquisita nella fase di qualificazione della saldatura sul relativo mock-up. La sua realizzazione è stata possibile grazie alla collaborazione di ENEA, ASG, F4E e del produttore della cassa Walter Tosto S.p.A.. Infatti le saldature della cassa, che per avere un'adeguata resistenza a fatica devono essere tutte a piena penetrazione e a completa fusione, hanno comportato significative modifiche alla geometria dei componenti della cassa per rendere possibile da un lato la fabbricazione dei cianfrini e dall'altro assicurare la loro saldabilità garantendo nel contempo adeguata protezione al sottostante avvolgimento. La messa in tavola di questo importante disegno è stata preceduta da diverse riunioni in cui sono state discusse tutte le opzioni per arrivare ad un'ottimizzazione.

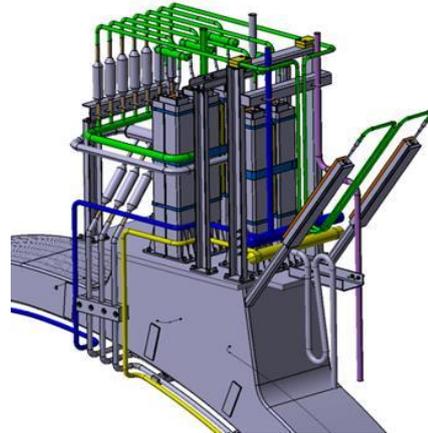


Figura 332. Modello 3D del circuito di raffreddamento dell'elio della bobina toroidale

Così come i rapporti di prova forniscono informazioni sulla correttezza delle operazioni effettuate, tanto durante le fasi di qualifica che durante la produzione di serie, e, pertanto, devono essere considerati come documenti di scambio all'interno del progetto, in modo simile le specifiche tecniche devono essere prodotte in accordo tra i diversi attori (progettista, esecutore e utente finale). La stesura delle specifiche tecniche dei vari componenti e attrezzature implica dunque un processo di revisione continua al fine di armonizzare i requisiti finali della macchina, con il limite di budget e le tecniche di fabbricazione disponibili. A tale riguardo, nell'ultimo anno un importante obiettivo raggiunto è stata la definizione della specifica tecnica per la lavorazione meccanica della bobina toroidale finita, completa delle saldature di chiusura della cassa di contenimento. Le operazioni sono state definite sulla base dei disegni sviluppati da ENEA in collaborazione di F4E e quelle associate all'approvvigionamento di numerose attrezzature.

Per quanto riguarda l'approvvigionamento delle attrezzature, nel corso del 2013 la linea di avvolgimento (Figura 333), progettata per la produzione di ciascuno dei 54 doppi pancake (DP), che costituiscono il nucleo dei magneti, è stata revisionata e la relativa messa in servizio è stata completata. Parallelamente, gli altri impianti che devono essere utilizzati nel corso della fabbricazione dei magneti, come lo stampo di impregnazione per il pacco di avvolgimento (WP) costituito dalla sovrapposizione di sei DP, o la camera da vuoto per i test di accettazione finale della bobina completa, sono stati installati e sono pronti per la messa in servizio con il primo WP.



Figura 333. Vista d'insieme della linea di avvolgimento assemblata presso ASG

All'interno della linea di avvolgimento, il conduttore in uscita dall'aspo svolgitoro viene raddrizzato nelle due direzioni, in modo da ottenere una buona rettilinearità necessaria per la fase di avvolgimento (tratti dritti). La raddrizzatrice ha una serie di rulli disposti su entrambe le direzioni, sincronizzati con la velocità di funzionamento della linea. Una volta raddrizzato e pulito, il conduttore deve essere curvato per creare le spire che compongono i due strati del doppio pancake. Il conduttore, in entrata ed in uscita dall'unità piegatrice, deve essere ben guidato per mezzo di rulli. Il metodo di avvolgimento richiede la preparazione della scorta per l'esecuzione del secondo strato del DP. La preparazione della scorta è realizzata con una linea dedicata composta da un aspo svolgitoro porta rocchetto di trasporto, un impianto di pulizia e un aspo avvolgitoro porta rocchetti di avvolgimento di primo e secondo strato (Figura 334).

Sulla scorta dei risultati ottenuti dai test eseguiti sul mock-up del doppio pancake della bobina toroidale, realizzata nell'ambito del PAR 2011, si è perfezionata la regolazione del software centralizzato per il controllo delle fasi di avvolgimento e si sono adottati provvedimenti per migliorare il funzionamento degli apparati delle diverse fasi di lavoro per assicurare l'accuratezza del manufatto. La necessità di prolungare la messa a punto della linea di avvolgimento oltre i termini inizialmente previsti ha avuto inevitabilmente impatto sulla data di avvio della fabbricazione di serie. Tale ritardo, che è possibile pensare di recuperare nel corso della fabbricazione dei 54 DP previsti, è stato ritenuto inevitabile al fine di assicurare il rispetto dei requisiti dimensionali prescritti sui magneti che si traducono nel rispetto dei requisiti prestazionali della macchina tokamak.

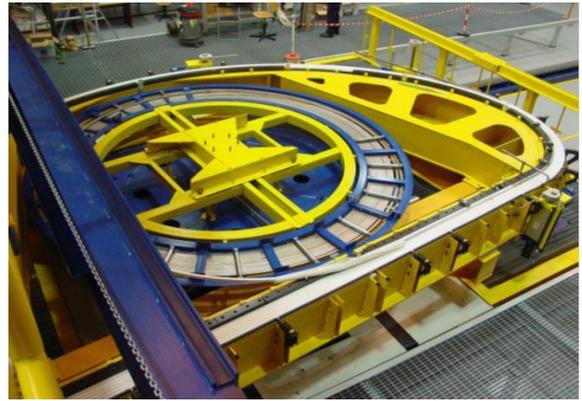


Figura 334. Riserva avvolta all'interno della tavola roto-traslante alla fine dell'avvolgimento del primo strato del DP

Si descrivono sinteticamente nel seguito i principali interventi di messa a punto operati sulla linea. Il primo intervento ha riguardato la riprogettazione e conseguente collaudo dell'impianto di sabbiatura. Tale dispositivo, che nel progetto originale era stato collocato prima dei rulli di piegatura è stato infine montato a valle di questi. Tale scelta è stata adottata per garantire il mantenimento della rugosità prevista sulla superficie del conduttore necessario ad assicurare l'adeguata adesione della resina e quindi la resistenza a taglio dell'isolante richiesta. L'azione dei rulli di curvatura sul conduttore aveva infatti determinato un liscivamento della superficie a scapito del processo di sabbiatura precedente. Lo spostamento dell'impianto di sabbiatura ha inevitabilmente comportato la progettazione ex-novo di questo in quanto la sabbiatrice viene ad operare su un conduttore curvato con raggi di curvatura sempre variabili in relazione alla posizione di avvolgimento invece che su conduttori dritti come inizialmente previsto. A tal fine la sabbiatrice è stata ridotta di dimensioni e collocata su un braccio rotante in grado di seguire i movimenti del conduttore in uscita dalla curvatrice. Ulteriori gradi di libertà sono stati introdotti per evitare impuntamenti del conduttore nei tratti a raggio più stretto e i quattro ugelli disposti lungo le diagonali della sezione del conduttore sono stati potenziati per garantire il raggiungimento della rugosità prescritta. Una volta montata nella nuova configurazione, la sabbiatrice è stata oggetto di collaudo durante il quale è stato possibile riscontrare l'assenza di sabbia sulla superficie del conduttore e il raggiungimento della rugosità prescritta.

Similmente alla sabbiatrice anche l'unità di nastratura è stata oggetto di una paziente attività di riprogettazione. Anche nel caso della nastratrice infatti, il test di avvolgimento condotto sul dummy DP ha evidenziato la difficoltà a seguire il conduttore nei tratti a raggio di curvatura più stretto costringendo a continue interruzioni e riprese della nastratura a mano. La nuova nastratrice montata sulla linea è adesso dotata di due gradi di libertà in più, può ruotare attorno ad un asse verticale e spostarsi orizzontalmente mentre è supportata da un braccio ruotabile ed estendibile (Figura 335). I collaudi effettuati sulla nuova configurazione di nastratrice e sabbiatrice hanno evidenziato il superamento delle criticità precedentemente riscontrate.

Un altro organo che ha richiesto un'attenta messa a punto è stato l'unità di raddrizzamento. Questa unità posta sul primo portale fisso della macchina raddrizza il conduttore proveniente dallo spool sul quale è stato avvolto durante la sua fabbricazione. I test di avvolgimento condotti con il dummy DP hanno evidenziato dei fenomeni di flessione e torsione che sono stati corretti attraverso la messa a punto dei vari organi di raddrizzatura. La raddrizzatrice è infatti costituita di due stadi uno per la raddrizzatura grossolana ed un'altra per quella fine in entrambe le direzioni orizzontale e verticale. Le operazioni di collaudo conseguenti hanno mostrato il superamento delle criticità precedentemente riscontrate.



Figura 335. Nastratrice su braccio rotante

Anche se non direttamente connesso alla linea di avvolgimento, merita di essere citata, tra i processi di aggiustamento che hanno determinato i ritardi nella fase di avvio, la progettazione, costruzione, e conseguente collaudo sulla linea del sistema di "pre-bending". Tale dispositivo altro non è che una pressa in grado di indurre uno stato tensionale sul conduttore in corrispondenza dell'ingresso di elio. La necessità di introdurre questo

dispositivo è stata evidenziata attraverso degli studi analitici in cui la resistenza a fatica della saldatura dell'ingresso di elio risultava fortemente dipendente dai processi di distensione superficiale da applicare al termine delle operazioni di saldatura. Data l'impossibilità di introdurre dei meccanismi automatici e riconosciuta la scarsa efficacia di molti processi che coinvolgono solo le fibre superficiali del materiali, è stato deciso di effettuare questa attività, non prevista, di progettazione e collaudo del dispositivo di pre-bending prima della fabbricazione dei primi DP di produzione così da assicurare a tutta la produzione la vita a fatica richiesta dalle specifiche.

Infine, è necessario ricordare la messa a punto del software di controllo che gestisce in maniera sincrona tutti i dispositivi installati sulla linea di avvolgimento e che è in grado di avvolgere con una velocità massima di 1 m/min il conduttore sulla base dei disegni CAD della linea media del pacco di avvolgimento. L'introduzione dei nuovi dispositivi ovvero il loro spostamento all'interno della linea ha comportato necessariamente una fase di riscrittura del software e conseguente collaudo.

A conclusione della predisposizione finale di tutti i componenti della linea si è avviata la fabbricazione dei sei doppi pancake (Figura 336) che compongono la prima bobina toroidale. La fabbricazione dei primi due doppi pancake si è conclusa.

Relativamente alle altre attrezzature completate nel corso del 2013, l'elenco comprende:

- attrezzatura per pre-bending sull'ingresso di elio;
- telaio di trasporto e movimentazione delle bobine;
- attrezzatura di inserimento e assemblaggio del WP nella cassa;
- attrezzatura di embedding.

L'attrezzatura di "pre-bending" mostrata Figura 337 è stata oggetto di un'attenta fase di progettazione e di qualifica. Il suo ruolo è quello di conferire al conduttore uno stato tensionale di trazione opposto a quello prodotto dalle tensioni residue dopo la saldatura dell'ingresso di elio, con ciò conferendo al componente una maggiore resistenza a fatica e quindi eliminando la necessità di ulteriori trattamenti superficiali distensivi sul cordone di saldatura.

La progettazione e realizzazione dei telai di trasporto (9,3 m x 4,9 m in pianta) delle bobine toroidali finite e pronte ad essere sottoposte a cold test a Saclay (Francia) è stata completata. Il telaio di trasporto è autoportante e dotato di ruote di grande portata per consentire la movimentazione della bobina all'interno dello stabilimento della ASG.

Lo stampo per l'impregnazione della cassa non è stato ancora assemblato, in Figura 338 si riporta un'immagine CAD del banco di impregnazione con la bobina mostrata in trasparenza al suo interno. Uno dei componenti principali è il telaio di supporto in costruzione.

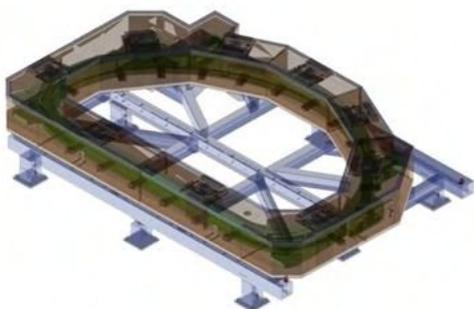


Figura 338. Banco di impregnazione e relativa attrezzatura di embedding



Figura 336. Doppio Pancake sulla tavola roto-traslante della linea di avvolgimento



Figura 337. Attrezzatura per pre-bending dell'ingresso di elio

Lo scopo dell'impregnazione di embedding è quello di consolidare il WP, all'interno della cassa di contenimento realizzata in acciaio inox. La posizione del WP all'interno della cassa viene assicurata mediante spaziatori in vetro-resina G10, mentre il volume libero tra la cassa ed il WP viene riempito con tele di vetro, che verranno successivamente impregnate con resina epossidica. La bobina dovrà essere posizionata su un telaio inferiore di supporto, il cui piano dovrà consentire il posizionamento inclinato del WP durante il ciclo di impregnazione per facilitare il flusso della resina, evitando la formazione di bolle. Tra la bobina e il telaio inferiore di supporto sono posizionati opportuni elementi isolanti per limitare il flusso termico tra la bobina ed il telaio e consentire le dilatazioni termiche della bobina durante il riscaldamento. L'impianto è corredato di un

sistema di riscaldamento per consentire il raggiungimento delle temperature previste dal ciclo di impregnazione di embedding. Tutto il sistema sarà adeguatamente coibentato per limitare l'emissione di calore verso l'esterno.

L'attrezzatura di inserimento consta di una struttura centrale (nucleo) attrezzata con staffe e dispositivi di ancoraggio che permettono di agganciare alla stessa contemporaneamente sia il WP che le parti esterne della cassa ("straight leg" e "curved leg"). La presenza di viti a passo fine sui dispositivi di aggancio consente la regolazione della posizione relativa di WP e cassa. Gli organi sono stati dimensionati in modo da consentire l'accesso al volume tra WP e cassa per inserire spessori di compensazione tra le 2 parti.

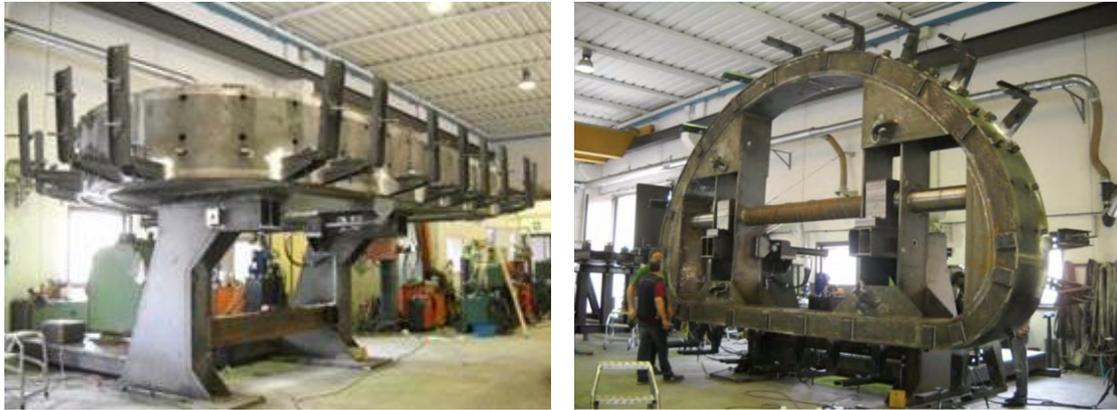


Figura 339. Attrezzatura di inserimento dell'avvolgimento nella cassa (in posizione orizzontale e verticale)

Riguardo alle attività di qualifica condotte è opportuno menzionare:

- qualifica saldatura trasversale della cassa;
- prove di tenuta criogeniche degli isolatori elettrici;
- misure criogeniche di resistenza elettrica del giunto elettrico interno e delle terminazioni,
- misura delle caratteristiche degli strand del conduttore.

L'ASG si è dotata di impianti dedicati alle saldature di chiusura finale della bobina nella cassa di contenimento. Gli impianti sono composti da due saldatrici tipo TIG utilizzate per i primi cordoni di saldatura e due saldatrici tipo MIG utilizzate per il riempimento finale. Le saldature di giunzione delle tubazioni dell'elio liquido sono realizzate da saldatrici orbitali automatiche tipo Polisoude. Inoltre sono state sviluppate attrezzature per il raffreddamento del cordone di saldatura nel corso delle operazioni. Due saldatori patentati sono stati qualificati in modo specifico per la saldatura del bocchello dell'ingrasso di elio e per le saldature finali di chiusura della cassa.

In particolare, l'attività di qualifica di saldatura è stata preceduta da un'attività di pre-qualifica su piastre di acciaio della stessa tipologia di quello impiegato nelle casse per confermare la sequenza di saldatura e dimensionare i sistemi di protezione al rovescio che assicurano al contempo un'adeguata protezione del sottostante WP e un supporto, attraverso flusso di gas inerte, al bagno di saldatura. L'attività di qualifica condotta sul mock-up della gamba curva della cassa di contenimento della bobina toroidale ha consentito di verificare le distorsioni conseguenti al processo di saldatura e la prova delle tecniche di controllo non distruttivo da applicare su saldature di componenti nucleari. La misura del ritiro di saldatura ha permesso la realizzazione dei componenti delle casse, dotati di sovrasspessori adeguati alle successive operazioni di saldatura. La qualifica ha inoltre permesso di testare l'inserimento del mock-up dell'avvolgimento della bobina all'interno della cassa e della sua fasciatura con tele di vetro come previsto dal processo di impregnazione nella cassa (embedding). Il sistema di protezione al rovescio assicura un'adeguata protezione della sottostante tela di vetro della bobina: infatti le temperature misurate durante il processo di saldatura non superano i 100 °C. Lo stesso sistema, attraverso flusso di gas inerte, provvede a sostenere e raffreddare il bagno di saldatura. Questa fase di qualifica ha permesso inoltre di verificare il giusto posizionamento delle mire applicate sul simulacro della bobina e misurate dall'esterno della cassa.

L'attività di qualifica in condizioni criogeniche sugli isolatori è stata a sua volta preceduta da test di tenuta a temperatura ambiente. Le prove criogeniche sono state condotte su tre campioni che hanno subito diversi trattamenti di invecchiamento. Un campione è stato sottoposto a 5 shock termici mediante immersione in bagno di azoto, un campione a 10 cicli di raffreddamento controllato con velocità di raffreddamento inferiore a 30 K/h e un campione è stato testato senza essere preventivamente invecchiato. Tutti gli isolatori testati hanno superato le prove criogeniche mostrando valori del tasso di fuga inferiori a quello prescritto nelle specifiche.

Le misure di resistenza elettrica del campione di giunto interno e delle due terminazioni preparate da ASG sono state condotte presso il laboratori dell'ENEA di Frascati (Figura 340). Le misure sono state eseguite immergendo il campione dentro un criostato contenente elio liquido e conferendo corrente al campione attraverso dei discendenti di corrente. Le condizioni di prova sono state quindi più impegnative di quelle operative in cui un flusso di elio liquido viene fatto scorrere nel conduttore assicurando un costante smaltimento del calore prodotto per effetto Joule all'interfaccia rame-superconduttore sulla scarpa del giunto e delle terminazioni. Nonostante ciò i valori misurati ($2 \pm 0,2 \text{ n}\Omega$) ai diversi flat-top di corrente (5, 10, 15 e 20 kA) si sono mantenuti all'interno dei valori previsti in specifica. La figura mostra il campione del giunto e delle terminazioni prima dell'esecuzione dei test una volta completate le fasi di assemblaggio dei sensori e la connessione dei discendenti di corrente e degli schermi di rame necessari per limitare gli ingressi termici sul bagno d'elio.

Nell'ambito delle operazioni di qualifica della saldatura del bocchello di ingresso di elio al conduttore sono stati eseguite prove per la misura delle caratteristiche del superconduttore. La corrente critica degli strand del superconduttore 4K ha evidenziato assenza di fenomeni di degradazione dovuti all'incremento di temperatura durante le operazioni di saldatura.

Per maggiori dettagli fare riferimento al rapporto RdS/2013/185.



Figura 340. Giunto elettrico prima dell'immersione nel bagno di elio per la misura elettrica

a.2 Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato aggiudicato alla ditta Walter Tosto nel mese di luglio 2012.

All'inizio del 2013 i mock-up rappresentativi delle sezioni principali dei casing sono stati completati e spediti alle due ditte responsabili della costruzione delle bobine (ASG Superconductors e ALSTOM) che hanno così potuto eseguire i test di inserimento del winding pack e completare le qualifiche di loro competenza (saldature di chiusura del TF coil). I mock-up sono stati infatti realizzati con i cianfrini per le saldature di chiusura longitudinali e trasversali. I due set di mock-up, sono stati forniti completi di tutta la documentazione di progettazione, produzione e controlli. La costruzione dei mock-up ha inoltre permesso di testare, validare e qualificare i processi speciali coinvolti nella produzione.

Tutte queste azioni hanno permesso di finalizzare e dettagliare le soluzioni progettuali e i processi costruttivi e completare la progettazione e modellazione delle casse di contenimento (Figura 341).

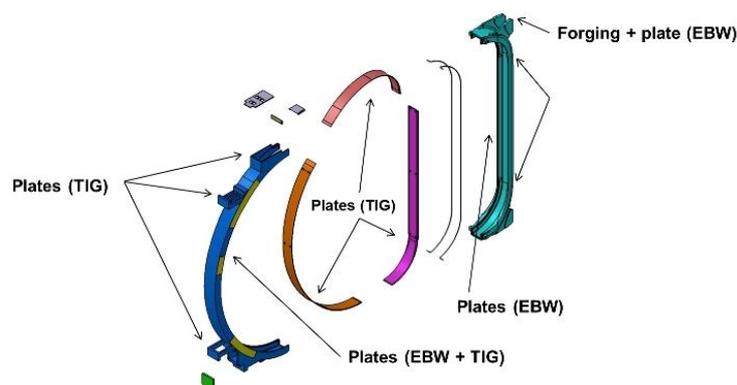


Figura 341. Componenti costituenti la cassa di contenimento della bobina toroidale

In accordo a quanto previsto nel piano di controllo di qualità il programma di qualifica dei componenti della cassa è stato terminato nell'ambito dell'annualità PAR 2012 ed ha riguardato le seguenti prove:

- qualifica dei processi di saldatura con redazione dei relativi Welding Book;
- rilievo delle conseguenti deformazioni di saldatura attraverso l'uso di mock-up della cassa;
- applicazione delle procedure di vibration stress relief (VSR) per la mitigazione degli stress residui;
- Leak e Pressure test con emissione di procedure;
- Ispezioni dimensionali eseguite con metodologia laser.

La progettazione di dettaglio delle casse, sia del casing tipo ASG che del casing tipo ALSTOM è stata preparata con due set distinti di documentazione, uno per ASG e uno per ALSTOM, completa di modelli CATIA 3D, disegni costruttivi 2D (per circa 100 tavole per ciascun tipo) e welding maps. I disegni sono stati sviluppati a livello di produzione.

L'utilizzo delle attrezzature per la composizione e successiva lavorazione dei componenti della cassa e la definizione dei processi di lavorazione hanno permesso di completare la realizzazione dei componenti per la composizione di 3 casse di contenimento.

La documentazione completa è stata presentata, analizzata, discussa ed approvata nel corso di meeting dedicati organizzati in ENEA Frascati ai quali hanno partecipato F4E, CEA, ASG Superconductors e ALSTOM.

L'approvazione della progettazione di dettaglio ha permesso l'inizio delle attività di costruzione ed in particolare sono stati tagliati formati e lavorati tutti i componenti per la realizzazione dei primi tre casings.

ENEA ha monitorato le attività della ditta Walter Tosto con contatti quotidiani telefonici, videoconferenze settimanali ed incontri con frequenza mensile presso gli stabilimenti di produzione della ditta.

In sintesi nel corso del 2013 sono state eseguite le seguenti attività:

- Completamento della costruzione di mock-up rappresentativi dei casing dei TF coils di JT-60SA e fornitura ad ASG Superconductors ed ALSTOM per la validazione della tecnologia di saldatura di chiusura della bobina.
- Finalizzazione della progettazione di dettaglio dei casing dei TF coils di JT-60SA con emissione dei modelli CAD 3D dei componenti delle casse, dei disegni costruttivi completi, delle welding map e dei welding book.
- Completamento della validazione e qualifica dei processi speciali coinvolti nelle attività di costruzione e controllo
- Inizio delle attività di costruzione dei casing dei TF coil di JT-60SA
- Lavorazione dei componenti per la realizzazione dei primi tre casings per JT-60SA

Per maggiori dettagli fare riferimento ai rapporti RdS/2013/186 e 259.

a.3 Realizzazione degli "Switching Network Unit" (SNU)

Il Piano Annuale 2012 prevedeva la realizzazione di un sistema di commutazione veloce di potenza per applicazioni fusionistiche, denominato "switching network unit" (SNU) nell'ambito del progetto internazionale JT-60SA. Secondo gli accordi internazionali, l'Italia deve fornire quattro di questi sistemi direttamente in Giappone per i sistemi di alimentazione del Solenoide Centrale (CS) di JT-60SA (Figura 342).

Gli SNU giocano un ruolo fondamentale negli esperimenti sul plasma finalizzati alla fusione nucleare. In principio, uno SNU può essere visto come un sistema di commutazione veloce di potenza per la corrente continua che inserisce molto rapidamente un resistore nel circuito di alimentazione allo scopo di produrre l'alta tensione necessaria al breakdown ed alla formazione del plasma.

Le prestazioni richieste al prototipo di SNU non erano raggiungibili da nessun dispositivo attualmente disponibile in commercio. In particolare, il sistema di commutazione è in grado di:

- aprire/chiedere in 1 ms una corrente fino a 20 kA DC;
- deviare la corrente verso apposite resistenze fino a raggiungere una tensione nominale di 5 kV;
- inserire in meno di 1 ms ulteriori resistenze allo scopo di ridurre tale tensione e, di conseguenza, la derivata di corrente;
- dissipare oltre 90 MJ di energia durante un ciclo di funzionamento;
- raggiungere uno stato di "autoprotezione" entro 150 ms;
- sincronizzarsi le sue operazioni a quelle degli altri sistemi dell'impianto JT-60SA;
- ripetere questo tipo di operazioni, di per sé eccezionali, anche decine di volte al giorno per diversi anni senza richiedere manutenzioni particolari.

La progettazione tecnica e la gestione della fornitura sono state affidate all'ENEA che ha operato in stretta collaborazione con i partner internazionali, specialmente con F4E e JAEA. La natura non convenzionale del

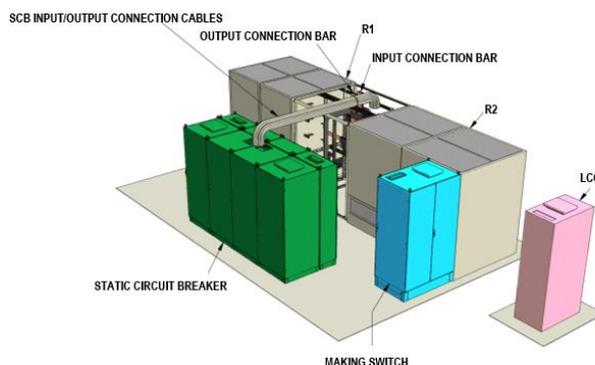


Figura 342. Layout finale di tutti gli elementi di uno SNU

prototipo ha richiesto una progettazione dedicata con aggiornamenti continui, anche in relazione agli sviluppi dell'esperimento JT-60SA e delle altre forniture. Nel corso del 2013, la documentazione di progetto (First Design Rapporto) presentato dall'ENEA è stato approvato ufficialmente dal team di coordinamento internazionale di JT-60SA.

A seguito di una procedura negoziata gestita dall'ENEA, la realizzazione industriale del prototipo è stata affidata all'impresa OCEM Energy Technology di San Giorgio di Piano (BO) che ha completato l'assemblaggio di tutti gli elementi del prototipo nel settembre 2013.

Nella presente annualità sono state svolte le seguenti attività:

- ingegnerizzazione degli SNU con identificazione dei componenti industriali e della strumentazione di corredo;
- sviluppo dei disegni di layout e di fabbrica;
- approvazione ufficiale da parte del team di coordinamento internazionale di JT-60SA del rapporto di progetto (First Design Rapporto) e della documentazione a corredo;
- pianificazione delle attività per la realizzazione del prototipo di SNU (primo SNU);
- ordine dei componenti da utilizzare nel prototipo;
- assemblaggio e la disposizione negli armadi di alimentazione e controllo del prototipo;
- gestione del contratto pluriennale stipulato con OCEM Energy Technology per la realizzazione industriale del prototipo;
- predisposizione delle procedure di prove per la verifica del prototipo;
- prima prove su alcuni sottosistemi del prototipo;
- redazione ed aggiornamento della documentazione richiesta dagli accordi internazionali BA, PA e AoC (Procurement Plan, Procurement Schedule, Risk Table, Periodic Rapporto, ecc.);
- partecipazione agli incontri tecnici e gestionali con i partner internazionali del progetto JT-60SA (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie) per il coordinamento, la definizione delle interfacce, lo scambio di informazioni e l'aggiornamento del progetto.

I punti di forza e le caratteristiche specifiche del progetto sono:

- la commutazione principale basata su una configurazione ibrida elettromeccanica-statica, ottenuta inserendo un sistema elettronico (static circuit breaker, SCB) in parallelo ad un contattore meccanico (by-pass switch, BPS);
- l'introduzione di diversi livelli di ridondanza nel contattore e in altre parti;
- l'uso di otto Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) in parallelo (Figura 243);
- l'uso di diodi di disaccoppiamento in serie agli IGCT
- l'aggiunta di un circuito di snubber "progressivo", progettato specificatamente per l'applicazione, in grado di regolare la velocità di salita della tensione allo scopo di ridurre lo stress sui componenti interni ed esterni agli SNU;
- il dimensionamento dei resistori di breakdown per mantenere le variazioni di tensione e le sovratemperatura nell'ambiente entro i limiti richiesti dall'impianto;
- l'implementazione del Making Switch (MS, Figura 344) attraverso quattro tiristori potenzialmente indipendenti.

Il prototipo è costituito da diversi "cubicoli" che verranno connessi come mostrato in Figura 342. La fotografia in Figura 343 mostra il dettaglio di una della parti più innovative del prototipo, l'interruttore elettronico SCB ottenuto dal parallelo di otto moduli a IGCT.

Le 4 SNU sono controllate da un unico Local Control Cubicle (LCC), incluso nella stessa fornitura. Il prospetto di Tabella 74 permette di apprezzare un miglioramento generale rispetto alle specifiche iniziali, che già includevano alcuni margini di sicurezza. Naturalmente, la maggior parte delle caratteristiche riportate sono solo stime attuali e devono essere confermate da risultati sperimentali, durante i test ufficiali già programmati.



Figura 343. Armadio dell'interruttore SCB. Sono visibili gli otto moduli basati su IGCT



Figura 344. Armadio Making Switch con quattro tiristori in parallelo

Tabella 74. Confronto tra le prestazioni e i limiti degli SNU progettati e le esigenze dell'esperimento JT-60SA

Caratteristica	Specifiche JT-60SA	Progetto finale
Corrente nominale	±20 kA	±20 kA
Tensione nominale (a terminali degli SNU)	5 kV	5 kV
Massima tensione (anche durante i transitori)	7 kV	5.5 kV
Tempo massimo di apertura/chiusura	1.5 ms	150 µs
Tempo di apertura nel caso peggiore	Non specificato	0.75 ms
Tempo di apertura del BPS (solo per riferimento)	15 ms	12 ms
Tempo di chiusura del MS	1 ms	<50 µs
Capacità di interruzione (unidirezionale)	25 kA (solo SCB)	25 kA
Limite termico	<70 GA ² s	>130 GA ² s
Lunghezza massima dell'impulso	250 s	250 s
Intervallo di ripetizione	1800 s	1800 s
Caduta di tensione in stato di chiusura	Alcuni volt	<0.1 V
Tolleranza di ciascun resistore di breakdown (a 20°C)	±2%	Migliore di ±1.5%
Massima variazione della resistenza con la temperatura	10%	8%
Energy dissipabile nei banchi R1 e R2	70/90 MJ	>>90 MJ
Massimo sbilanciamento di corrente tra rami paralleli	20%	10%
Tempo massimo per interventi di protezione	Non specificato	150 ms
Cicli di apertura/chiusura in assenza di aria compressa	2	Illimitati
Numero di operazioni (solo manutenzione ordinaria)	10 ⁴	10 ⁴

Anche se il sistema è stato dimensionato per le caratteristiche dei convertitori AC/DC e degli avvolgimenti della macchina JT-60SA, i principi e le architetture innovativi sviluppati durante il progetto possono trovare impiego in diversi sistemi dedicati alla fusione nucleare ma anche in altri settori industriali.

Data l'innovatività e la criticità di alcune parti del prototipo, alcune prove su di esse sono state anticipate prima dell'assemblaggio finale. Nei prossimi mesi saranno effettuate ulteriori prove ufficiali presenziate (Factory Type Test) su alcuni elementi del sistema (contattore BPS, resistori di breakdown, interruttore elettronico SCB) come previsto dagli accordi internazionali e dalle specifiche tecniche.

E' da evidenziare che grazie ad un'ottimizzata distribuzione degli ordini dei componenti si è riusciti a rendere rapide le operazioni di fornitura. Inoltre l'esecuzione di prove preliminari sui componenti acquisiti ha reso confidenti a procedere più rapidamente verso la realizzazione dei sottoassiemi del prototipo di SNU. Tale gestione della commessa ha consentito la realizzazione di tutti i sottoassiemi dello SNU per la composizione finale del sistema prototipo.

Infine, le operazioni del prototipo nell'insieme verranno testate a piena corrente e piena tensione nella prima metà del 2014. Dopo l'esito successivo di tali prove, il fornitore industriale sarà autorizzato a realizzare le ulteriori tre SNU. La consegna in Giappone e la messa in servizio dell'intera fornitura sono programmate per il 2016.

Per maggiori dettagli fare riferimento al rapporto Rds/2013/187.

a.4 Realizzazione di parte degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA

La subtask prevede la fornitura di otto alimentatori AC/DC non convenzionali e sei trasformatori MT/BT, destinati ad erogare le elevate correnti richieste da alcuni avvolgimenti superconduttori di JT-60SA. La fornitura include anche tutti i relativi interruttori, fusibili, protezioni, controllori, sistemi di raffreddamento, collegamenti di media e bassa tensione e quanto altro necessari al loro funzionamento.

Dopo aver condotto accurati studi di fattibilità, l'ENEA, sulla scorta della propria pluriennale esperienza nelle alimentazioni elettriche per la fusione nucleare, in costante contatto con altri enti per la fusione nucleare europei ed internazionali, ha eseguito la progettazione dei sistemi di alimentazione necessari ed ha elaborato le specifiche tecniche e di gestione della qualità finalizzate all'emissione di un bando di gara per l'assegnazione del contratto per la fornitura degli otto sistemi di alimentazione elettrica.

L'ENEA, dopo aver selezionato ed invitato diversi fornitori industriali europei, ha assegnato la fornitura di tutti i sistemi di alimentazione elettrica al Raggruppamento Temporaneo di Imprese (RTI) tra le ditte POSEICO e JEMA.

Entrambe le ditte possono vantare un'esperienza pluriennale nel campo dell'elettronica di potenza con competenze specifiche complementari nella componentistica e negli impianti per fusione nucleare.

Successivamente, l'impresa assegnataria ha consegnato le prime bozze dei documenti per l'ingegnerizzazione degli otto sistemi di alimentazione ed in particolare il dimensionamento esecutivo dei trasformatori (Fase 1A) e la selezione della componentistica industriale dei sistemi di alimentazione (Fase 1B), fornendo una dettagliata descrizione delle scelte progettuali attuate.

Nel corso di una riunione congiunta che si è tenuta nel settembre 2013, e che ha visto la partecipazione di F4E e JAEA, sono stati descritti e discussi i documenti relativi alle fasi contrattuali 1A ed 1B ed è stato presentato il Piano di Gestione della Qualità. Le imprese hanno illustrato il procedere dei lavori effettuati sia per la fornitura degli otto alimentatori che dei sei trasformatori. Da allora, i lavori sono proseguiti seguendo le disposizioni contrattuali e quanto deciso nella riunione.

Grazie alle sinergie messe in atto dalle Aziende e alle pregresse esperienze acquisite nel settore dell'elettronica di potenza per applicazioni nucleari, la POSEICO - JEMA ha sviluppato sia gli aspetti specifici di ingegnerizzazione degli alimentatori che il dimensionamento esecutivo dei trasformatori realizzando un obiettivo in più rispetto a quanto previsto dal PAR 2012.

Le soluzioni proposte rispondono a quanto chiesto della specifiche tecniche ed in linea con le prestazioni attese dalla macchina JT-60SA. Alcune soluzioni alternative proposte sono ancora oggetto di discussione (ad esempio, la configurazione circuitale in serie o parallelo dei convertitori FPPC o la configurazione del crowbar) e verranno definite anche in base alle analisi di sistema insieme agli altri partner. In ogni caso, la progettazione è stata sviluppata per ciascuna scelta alternativa e consente di identificare la maggior parte dei componenti dei sistemi di alimentazione elettrica non convenzionale. La fase di progettazione è stata basata su criteri di conformità alle specifiche tecniche, modularità, affidabilità, manutenibilità, mitigazione del rischio e analisi dei guasti. Infatti, per tutte le applicazioni sono richieste solo 4 tipologie di tiristori e un numero limitato di unità di "Power Assembly". Questi approcci progettuali ridurranno i rischi del progetto in fase di montaggio e di test, ma soprattutto avranno una ricaduta diretta durante la vita utile dell'impianto, sia in termini di migliore manutenibilità sia in termini di minor costo delle parti di ricambio.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/188.

b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

La realizzazione dei futuri impianti a fusione nucleare richiede la sperimentazione sul comportamento dei materiali strutturali nelle condizioni operative previste dai regimi di funzionamento di tali reattori. I materiali impiegati in tale ambito dovranno infatti resistere ad alte temperature con tassi di danneggiamento neutronico fino a 50 dpa per anno. La qualifica dei materiali strutturali da impiegare è quindi un passo fondamentale per l'esercizio in sicurezza di un reattore fusione.

La conduzione di ricerche appropriate in quest'area di sviluppo, che appare fortemente strategica per tutto il settore industriale, richiede la realizzazione e l'impiego di sorgenti di alti flussi neutronici con uno spettro energetico tipico della fusione. Per tale motivo nell'ambito delle attività tecnologiche di Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una sorgente di neutroni da 14 MeV detta IFMIF. IFMIF è un impianto finalizzato a testare i materiali candidati all'impiego in reattori a Fusione, consentendo la realizzazione di un database delle proprietà termofisiche di materiali irraggiati da impiegare per il progetto, la costruzione, il licensing e le operazioni in sicurezza del reattore a fusione dimostrativo DEMO.

IFMIF è costituito da due acceleratori lineari continui da 40 MeV per depositare due fasci da 125 mA di deutoni su un target costituito da un flusso di litio liquido. Tali deutoni per mezzo di una reazione di stripping danno luogo all'emissione di un intenso flusso neutronico, dell'ordine di $10^{18} \text{ nm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, che irraggia campioni di materiali posizionati a diverse distanze dal target. In questo modo si realizzano tre aree di irraggiamento ad alto, medio e basso flusso neutronico che consentiranno una completa caratterizzazione dei materiali idonea per la creazione del database summenzionato.

b.1 Campagna sperimentale dei sistemi di monitoring online per la misura delle impurezze in litio e per i fenomeni di cavitazione per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone) e costruzione del bersaglio a baionetta

Nel periodo di riferimento sono state implementate alcune piccole varianti al progetto per soddisfare le specifiche per l'installazione nel sito di Oarai dei dispositivi. Tutti i sistemi sono stati spediti in Giappone nel dicembre 2012, ma a causa dei ritardi nelle campagne sperimentali in esecuzione presso tale sito la loro installazione è prevista

solamente nel gennaio 2014. Pertanto non sono stati prodotti rapporti che afferiscono a questo obiettivo. Si segnala inoltre che a causa dei ritardi accumulati nelle operazioni dell'impianto ELTL (EVEDA Lithium Test Loop in Giappone) la realizzazione del bersaglio a baionetta risulta posticipata.

Sono state eseguite attività per lo sviluppo dell'acceleratore prototipo IFMIF Plant in Rokkasho (Giappone) per la realizzazione delle sue facility convenzionali come riportato di seguito:

- HVAC: Heating Ventilation Air conditioning;
- EPS: Electrical Power Supply;
- SWS: Service Water System;
- SGS: Service Gas System;
- HRS: Heat Rejection System;
- IFMIF Building Layout.

Il progetto internazionale IFMIF ha comportato intense attività di studio di interfaccia orientate allo sviluppo di dettaglio dei disegni in 3D dei Building interessati e ai processi di validazione e di integrazione dei sottocomponenti dell'acceleratore e del suo sistema di controllo.

Per maggiori dettagli si rimanda ai rapporti RdS/2013/282 e 284.

b.2 Campagne sperimentali a breve-medio termine (2000/4000 ore) per corrosione/erosione da litio

Rapporto sulla realizzazione e sul comissioning dell'impianto sperimentale per le prove di corrosione/erosione (LiFus6)

Le attività sperimentali per la determinazione dei tassi di erosione e corrosione promossi dal litio nei materiali è di primaria importanza per la progettazione di IFMIF. Il Centro Ricerca ENEA del Brasimone ha la responsabilità di condurre tali attività sperimentali che si inquadrano nell'ambito del progetto EVEDA/IFMIF del Broader Approach.

Gli obiettivi di queste attività sperimentali sono:

- determinare sperimentalmente i tassi di corrosione e erosione che si hanno sui materiali strutturali selezionati nel progetto IFMIF/EVEDA (EUROFER 97 e F82H) esposti a litio fluente a 350°C e ad alta velocità;
- validare sperimentalmente i sistemi di purificazione previsti per la cattura delle impurezze non metalliche, quali azoto, ossigeno, carbonio e idrogeno dal litio liquido.

A questo proposito, l'ENEA ha progettato e realizzato un nuovo impianto a litio, chiamato LiFus6, con cui si intende testare diversi provini di Eurofer 97 e F82H sotto le condizioni operative previste in EVEDA (litio liquido a alta velocità 15 m/s e alta temperatura 350 °C) e validare i sistemi di purificazione proposti per il suddetto fluido di processo.

L'impianto attualmente realizzato è costituito da tre sotto-sistemi: un loop principale dedicato ai test di corrosione/erosione; un loop secondario, in parallelo al principale, dedicato alla purificazione del litio dalle seguenti impurezze non metalliche: carbonio, ossigeno e idrogeno e un serbatoio dedicato alla purificazione del litio dall'azoto (trappola calda) collegato in serie con il serbatoio di stoccaggio del loop principale.

I principali dati di progetto dei tre sotto-sistemi sono riassunti in Tabella 75.

Tabella 75. Caratteristiche tecniche dell'impianto LiFus6

	Loop principale	Loop secondario (trappola fredda)	Trappola calda
Fluido di processo	Litio	Litio	Litio
Pressione di progetto, MPa	0,4	0,4	0,4
Temperatura di progetto, °C	400	400	750
Pressione operative, MPa	0,12	0,12	0,12
Velocità di flusso operativa, L/min	28	0,3	stagnante
Massima temperatura operativa, °C	350	350	650
Potenza scambiatore litio/aria, kW	3	2	-

Il loop principale a sua volta è costituito da:

- un serbatoio di stoccaggio e drenaggio. Esso è dotato principalmente di cavi scaldanti, termocoppie per il controllo della temperatura, passanti per i misuratori di livello e connessioni meccaniche con il piping di caricamento e drenaggio dell'impianto e con il serbatoio trappola calda. Durante il normale esercizio il litio stoccato è mantenuto ad una temperatura di circa 300 °C a pressione di circa 0,12 MPa con copertura di gas argon puro;
- una pompa elettromagnetica capace di fornire una portata volumetrica di circa 30 L/min necessaria al fine di avere i 15 m/s nella sezione di prova con una prevalenza di almeno 0,22 MPa;
- uno scambiatore di calore litio/aria con configurazione tubo in tubo da 3 kW necessario per il recupero della potenza termica dissipata dalla pompa EM;
- due misuratori di portata: il primo volumetrico (Vortex); il secondo massico (Coriolis);
- una sezione di prova contenente un massimo di 8 campioni;
- piping di connessione tra i vari componenti da 1" schedula 40 in AISI 316.

Il loop secondario è costituito da:

- un misuratore di portata volumetrico a micro-turbina;
- un resistivity meter per il controllo on-line del contenuto d'azoto in litio;
- uno scambiatore di calore litio/aria con configurazione tubo in tubo da 1,64 kW necessario per l'abbattimento della temperatura del litio da 350°C a 200 °C prima dell'ingresso in trappola calda;
- una trappola fredda dotata di 64 maglie di rete filtrante per la cattura dell'ossigeno, idrogeno e carbonio contenuti nel litio;
- piping di connessione tra i vari componenti da ½" schedula 40 in AISI 316;
- campionatore da 25 ml realizzato con tubo da ½" Swagelok in AISI 316.

La trappola calda, operante a 650°C e 0,12MPa, è costituita fondamentalmente da:

- un serbatoio in AISI 321 opportunamente strumentato;
- una cartuccia rimovibile realizzata in rete filtrante di AISI 321 che ha lo scopo di contenere il getter;
- il getter: il titanio sotto forma di pebbles;
- un campionatore per il controllo off-line del contenuto d'azoto in litio.

La realizzazione e l'installazione dell'impianto LiFus6 presso la hall sperimentale del C.R. Brasimone hanno avuto luogo tra la seconda metà del 2012 e la prima metà del 2013.

A seguito della ricezione e installazione dei diversi componenti meccanici dell'impianto si è proceduto all'esecuzione dei seguenti test d'accettazione: ispezione visiva della fornitura, prova di tenuta a freddo e prova idraulica in pressione..

In parallelo alla realizzazione meccanica dell'impianto si è proceduto alla progettazione e realizzazione del sistema di controllo e acquisizione dati d'impianto e all'acquisizione di tutta la strumentazione necessaria alla corretta conduzione della campagna sperimentale e all'esercizio in sicurezza dell'impianto.

Una volta completata l'installazione di tutta la strumentazione sull'impianto ENEA inizierà il commissioning dell'impianto. Il commissioning sarà costituito da:

- i. tests funzionali del sistema di controllo e acquisizione dati;
- ii. tests del circuito principale: verifica delle performance del circuito nelle diverse fasi operative dallo start-up allo shut-down, dal controllo della portata al drenaggio d'emergenza.
- iii. tests sulla diagnostica e sui sistemi di purificazione del litio: verifica delle performance del resistivity meter e dei sistemi di purificazione.

Il commissioning è organizzato secondo i seguenti step:

- *Initial (plant) conditions*

L'impianto LIFUS6 è completamente assemblato e strumentato; I campionatori sono installati e operativi; la coibentazione è completata; il DACS (Data Acquisition and Control System) è operativo; l'impianto si trova a temperatura ambiente (15-20 °C), con atmosfera d'aria; l'aria compressa per l'attivazione delle valvole pneumatiche è disponibile; l'argon di copertura è disponibile; sistema rilevamento e spegnimento incendi operativo.

- *Blank tests*

I blank tests includono: la verifica del corretto funzionamento di tutti i cavi scaldanti presenti nell'impianto; la verifica dei due scambiatori litio/aria; la verifica dei circuiti di distribuzione dell'aria compressa e dell'argon; la verifica di tutta la strumentazione installata in impianto; la verifica di tutte le valvole; del circuito da vuoto;

della pompa EM; del resistivity meter; dei sensori di fuga litio; verifica dello stop manuale d'emergenza d'impianto; verifica sensori di fumo.

▪ *Burning up tests*

Esecuzione di almeno tre cicli termici completi per verificare i diversi sistemi scaldanti e i due scambiatori nelle reali condizioni operative.

▪ *Lithium loading*

Questo step prevede:

- l'esecuzione del vuoto e del baking in impianto;
- la fusione del litio nel serbatoio S4 di Lifus3;
- il travaso del litio nel serbatoio di stoccaggio/drenaggio di LiFus6;
- il caricamento del litio in impianto;
- la circolazione del litio in impianto.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/124.

b.3 Validazione del sistema di purificazione del litio e calibrazione del sistema di monitoring online per misura delle impurezze in litio per l'impianto LiFus 6

Validazione del sistema di purificazione del Litio all'interno di Lifus 6 e del sistema di monitoring online di tali impurezze

Uno dei requisiti essenziali dei test di resistenza alla corrosione/erosione di materiali esposti a Litio fluente a 350°C all'interno dell'impianto Lifus 6, è l'elevato grado di purezza del litio liquido: la presenza di impurezze non metalliche (carbonio, ossigeno, idrogeno ed in special modo azoto), nella forma di anioni solvatati da Litio, aumenta infatti fortemente il comportamento corrosivo del metal-lo liquido. Per tale motivo, l'impianto Lifus 6 deve essere equipaggiato anche con sistemi e dispositivi in grado di effettuare la purificazione del litio (in particolare la concentrazione di azoto deve essere ridotta a valori inferiore a 30 wppm) ed al contempo monitorare l'effettivo livello di purezza raggiunto. La purificazione deve essere eseguita sia inizialmente, sul litio "sporco" appena caricato nell'impianto e prima di iniziare le prove di corrosione, sia successivamente, per garantire il mantenimento del grado di purezza desiderato, nel corso di tutta la durata delle prove. In riferimento alla Figura 345, che mostra il Design finale dell'impianto Lifus 6, gli elementi preposti alla purificazione sono la trappola fredda e la trappola calda; gli elementi preposti alla valutazione del grado di purezza sono invece il resistivity meter ed il campionatore per l'analisi chimica offline.

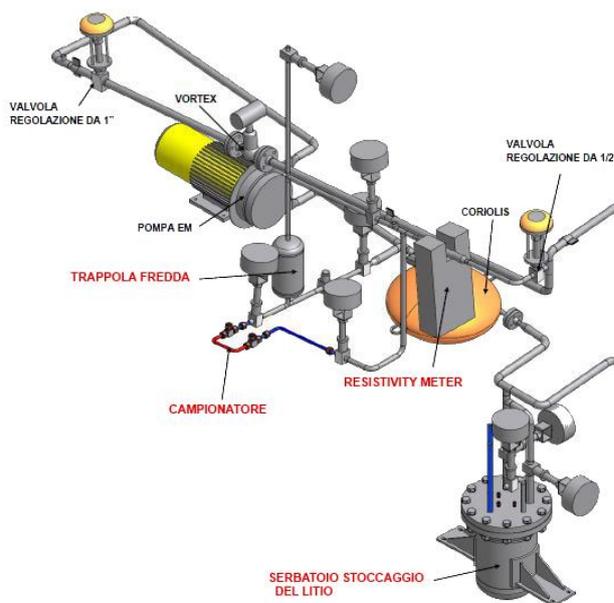


Figura 345. Design finale dell'impianto Lifus 6 (il collegamento tra serbatoio di stoccaggio e trappola calda non è mostrato in figura)

Lo scopo della trappola fredda è quello di ridurre la concentrazione in litio delle impurezze non metalliche promuovendo, grazie alla riduzione della temperatura a 200°C, il fenomeno di precipitazione ed accumulo al suo interno dei loro composti binari col litio stesso: il massimo contenuto residuo di impurezze risulta così 2 wppm per il carbonio, 7 wppm per l'ossigeno, 63 wppm per l'idrogeno e 1461 wppm per l'azoto. La trappola calda viene invece impiegata a 650°C per ridurre la concentrazione di azoto al di sotto del precedente valore, ancora troppo alto: il getter di titanio in pellets che la riempie è in grado di assorbire azoto dal litio grazie alla formazione di uno strato di nitrato di titanio, riducendo in tal modo la sua concentrazione al di sotto dei 10 wppm.

La differente filosofia di funzionamento della trappola fredda e della trappola calda si evince dalla Figura precedente. Poiché la trappola fredda è inserita all'interno del loop di Lifus 6, il litio scorre in maniera continua attraverso di essa durante le operazioni e la purificazione viene pertanto esercitata in maniera continua sulla frazione di litio che la attraversa. Al contrario la trappola calda, che non è parte del loop, ma è connessa solo al

serbatoio di stoccaggio del litio, è in grado di eseguire la purificazione solo ad istanti di tempo predefiniti, in condizioni statiche, sull'intera massa di litio precedentemente trasferita al suo interno: questo perché, essendo la cinetica di reazione fra titanio ed azoto molto lenta, il tempo di residenza all'interno della trappola deve risultare estremamente elevato.

Per quanto riguarda la valutazione delle impurezze residue, e di conseguenza dell'efficienza della purificazione eseguita, è possibile affidarsi sia all'output del resistivity meter (RM), che fornisce un valore continuo ed in tempo reale, sia al risultato dell'analisi chimica eseguita su campioni di litio prelevati (attraverso il campionatore) a tempi discontinui dall'impianto. Va sottolineato però che il resistivity meter è capace di dare solo un'indicazione del grado complessivo di impurezze, che tendono indistintamente a fare aumentare la resistività del litio, ma non è in grado di discriminare selettivamente fra esse (risulta comunque particolarmente sensibile all'idrogeno e di azoto); inoltre anche la sensibilità assoluta del RM è piuttosto bassa, non risultando possibile determinare variazioni di concentrazioni di azoto in litio inferiori ai 50 wppm circa. L'analisi chimica offline su campioni di litio ha il vantaggio invece di essere assolutamente specifica per l'azoto e di riuscire a determinare valori molto bassi di concentrazione, fino a pochi wppm, con una precisione relativa di qualche ppm; lo svantaggio è però di richiedere consistente lavoro e tempo prima di produrre un risultato quantitativo (circa 1 giorno dal prelievo del litio). Pertanto, nel mettere a punto la procedura di validazione del sistema di purificazione e di monitoring, si deve tenere conto di limiti e vantaggi di entrambe le soluzioni, mettendo quanto più in correlazione il risultato dell'analisi chimica eseguita su un campione di litio con l'output del RM al momento del prelievo di quel litio da Lifus 6, costituendo cioè la coppia di valori sperimentali (R,C) (resistenza elettrica del litio, concentrazione di azoto).

La procedura di validazione deve tener conto anche dei seguenti punti di partenza:

- non si dispone purtroppo di litio standard, caratterizzato da un valore noto e preciso di concentrazione di impurezze (non esiste in commercio).
- non siamo in grado di misurare il valore specifico di concentrazione di carbonio, ossigeno ed idrogeno in litio.

La procedura, di sotto dettagliata, verrà applicata prima di iniziare le prove di corrosione vere e proprie con l'impianto Lifus 6, che sono pianificate per dicembre 2013. Servirà sia per purificare tutto il litio inizialmente caricato nell'impianto, sia per verificare l'efficacia di funzionamento del sistema di purificazione impiegato e permettere una calibrazione funzionale del resistivity meter. La procedura può essere scomposta in due fasi separate e sequenziali: una prima fase, in cui si effettua solo la purificazione ad opera della trappola fredda, ed una successiva, intrapresa dopo il completamento della prima, in cui si esercisce la purificazione ad opera della trappola calda.

Nella prima fase, si esegue dapprima il caricamento iniziale di Lifus 6 con il litio e, dopo un tempo breve (~ 10'), si effettua una prima lettura del valore della resistenza contemporaneamente ad un prelievo di litio col campionatore per determinarne la sua concentrazione di azoto. Il valore di resistenza sarà quello massimo riscontrato in tutta la procedura (perché il litio è ancora del tutto impuro), così come massima sarà la concentrazione di azoto. Dopo circa 6 ore di circolazione del litio nell'impianto (quindi di purificazione ad opera della sola trappola fredda), si effettua una nuova lettura del valore di resistenza e si mette in relazione col risultato dell'analisi chimica sul litio prelevato nello stesso istante. Il valore di resistenza sarà adesso inferiore al precedente, perché la trappola fredda ha rimosso delle impurezze, in particolare idrogeno, mentre il valore di concentrazione di azoto sarà pressoché invariato. Dopo un altro giorno di circolazione nell'impianto, si ripete il solito step di lettura della resistenza + analisi chimica del litio: ancora una volta la resistenza sarà diminuita, mentre la concentrazione di azoto risulterà grosso modo invariata. Questa serie di campionamenti ed analisi si ripete fino a quando il valore di resistenza non risulta più decrescere. Al termine di questa fase, possiamo assumere di aver raggiunto il massimo valore di purificazione del litio dalle impurezze di carbonio, idrogeno ed ossigeno.

Nella seconda fase, tutto il Litio viene scaricato dal loop di Lifus 6 e trasferito nella trappola calda. La purificazione del litio da azoto è attivata alzando la temperatura della trappola calda a 650°C. Dopo un giorno di purificazione, la temperatura viene riabbassata per interromperla e tutto il litio viene ritrasferito nel loop dell'impianto. Dopo qualche minuto di circolazione, si va a leggere il valore di resistenza e si effettua l'analisi chimica offline sul litio prelevato corrispondente. In questo caso, ci si aspetta di osservare una diminuzione sia del valore di resistenza che di concentrazione di azoto rispetto ai corrispondenti valori determinati alla fine della prima fase. Tutto questo step (trasferimento del litio nella trappola calda, purificazione da azoto con la trappola calda, nuovo caricamento dell'impianto, lettura della resistenza e campionamento + analisi chimica) viene ripetuto, ottenendo una nuova coppia di valori per la resistenza e la concentrazione di azoto, entrambi inferiori rispetto ai rispettivi precedenti; si va avanti così fino a quando appunto il valore di resistenza risulti stabilizzato ed anche la concentrazione di azoto risulti costante e, auspicabilmente, inferiore a 30 wppm. Il tempo di purificazione nella trappola calda può essere

all'occorrenza modificato (rispetto ad 1 giorno) in ciascuno di questi step, in dipendenza della celerità riscontrata nel cambiamento dei valori. Al termine di questa fase, possiamo assumere di aver raggiunto il massimo valore di purificazione del litio anche dalle impurezze di azoto

Alla fine di tutta questa procedura:

- è possibile conoscere il valore di resistenza associato al litio più puro ottenibile nell'impianto col sistema di purificazione adottato. Tale informazione risulterà utile nel corso delle lunghe prove di corrosione/erosione, in quanto fornirà un valore di riferimento da cercare sempre di uguagliare.
- essendo noti i parametri geometrici del capillare del RM, dai valori di resistenza misurati, sarà possibile ricavare i corrispondenti valori di resistività, per verificare se siano o meno in accordo con i valori riportati in letteratura.
- plottando ogni valore di resistenza misurato nella seconda fase contro il corrispondente valore di concentrazione di azoto nel litio, sarà possibile costruire un grafico sperimentale, da cui ricavare una relazione pressoché lineare che colleghi queste due grandezze. Tale relazione sarà utile per predire in tempo reale, in maniera qualitativa, la concentrazione di azoto sulla base del valore di resistenza letto e monitorare, in maniera continua, il litio durante le prove di corrosione. In caso il RM o l'analisi chimica offline effettuata ad intervallo di tempi programmati indichino un valore troppo elevato di azoto, sarà necessario interrompere momentaneamente le prove per effettuare una nuova purificazione del litio tramite la trappola calda.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/125.

Procedura offline di analisi chimica della concentrazione di azoto in litio

La quantificazione della concentrazione di azoto all'interno del litio liquido che scorre a 350 °C all'interno dell'impianto Lifus 6 è di primaria importanza. Infatti, è noto che la presenza di azoto accentua fortemente il comportamento corrosivo del litio; pertanto il valore massimo di 30 wppm, necessario per non influenzare in maniera significativa i risultati delle prove sperimentali di corrosione-erosione da effettuarsi con Lifus 6 a partire da dicembre 2013, dovrà essere garantito e verificato sia all'inizio sia nel corso dell'intera campagna sperimentale.

La metodica impiegata per determinare la concentrazione di azoto fornisce un risultato offline, non è cioè continua, ma viene eseguita in maniera saltuaria su campioni di litio prelevati dall'impianto Lifus 6: i momenti esatti per il prelievo e la successiva analisi sono definiti sulla base sia della procedura iniziale di validazione dell'intero sistema di purificazione di Lifus 6, sia in base al bisogno occasionale di controllo nel corso delle prove sperimentali (bisogno evidenziato dal resistivity meter, che fornisce un'immagine continua del grado di impurezza complessiva del litio). La metodica si compone di vari step, di sotto dettagliati.

1) Campionamento del litio dall'impianto Lifus 6

Il primo step dell'analisi chimica offline è il campionamento di una piccola quantità di litio dall'impianto Lifus 6. Per effettuare questa operazione, l'impianto è stato equipaggiato con due differenti campionatori. Il primo è collocato in un bypass del circuito di purificazione, ossia un loop secondario dedicato alla finalità della purificazione agente in parallelo al loop primario. Il campionatore è normalmente vuoto ed escluso alla circolazione del litio, salvo venir riempito da esso all'atto del prelievo; una volta lasciato raffreddare, viene rimosso e sostituito da uno similare vuoto. Tale campionatore consente quindi il campionamento direttamente dall'impianto, per analizzare il litio che sta circolando nelle normali condizioni operative (350 °C, 15 m/s).

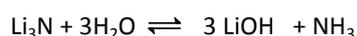
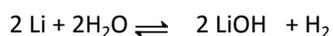
Il secondo campionatore è invece connesso direttamente alla trappola calda (al di fuori quindi del loop principale di Lifus 6), per verificare l'esito della purificazione appena eseguita all'interno di essa, senza dover ricaricare l'impianto, ed eventualmente ripetere lo step di purificazione fino a quando si sia ottenuto il valore target di concentrazione di azoto.

2) Trasferimento del litio dal campionatore all'impianto per l'analisi chimica

Una volta prelevato, il litio (circa 1 g) deve essere trasferito all'impianto in vetro dove dovrà essere sottoposto ad una specifica reazione chimica. Tale trasferimento viene eseguito all'interno di una glovebox dedicata, nella quale l'atmosfera di argon superpuro esclude il contatto fra litio e gas quali ossigeno, azoto e acqua. Visto che il litio solido risulta appiccicoso e aderisce molto alle pareti del campionatore, in questa fase può essere necessario anche riscaldarlo fino a fonderlo, così da trasferirlo più agevolmente in fase liquida.

3) La reazione chimica vera e propria

In un'apparato da laboratorio il litio, viene fatto reagire con acqua, aggiunta molto lentamente, sotto flusso di argon. Le reazioni principali che hanno luogo sono le seguenti:



Al di là della formazione di grandi volumi di idrogeno, l'aspetto importante è che tutto l'azoto interno al litio (presente come nitrato di litio), viene trasformato in ammoniaca (NH_3). Sempre sotto flusso di argon, l'ammoniaca è quindi distillata, condensata e raccolta in una soluzione acquosa contenente un eccesso di acido bórico (H_3BO_3), trasformandosi quantitativamente nello stabile ione ammonio (NH_4^+).

4) L'analisi cromatografica dello ione ammonio

La concentrazione dello ione ammonio nella soluzione precedentemente ottenuta viene determinata attraverso IC-HPLC (Ionic Chromatography - High Performance Liquid Chromatography). La massa di azoto totale così calcolata nella soluzione corrisponde esattamente a quella presente nel litio iniziale: nota la massa esatta di litio campionato, è possibile dunque risalire alla sua concentrazione di azoto, cioè il vero obiettivo di tutta la procedura. Grazie all'elevata sensibilità della tecnica cromatografica, è possibile misurare valori di concentrazione anche di pochi ppm di azoto nel litio iniziale.

L'analisi cromatografica viene eseguita presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Firenze, con la quale è stata attivata una collaborazione al riguardo. L'ottimizzazione dell'analisi cromatografica è comunque ancora in corso, allo scopo di minimizzare sempre più le possibili fonti di errore, sia legate intrinsecamente all'analisi, che al rischio di impurezze esterne che possano contaminare i campioni.

Al momento in ENEA non è ancora disponibile una glovebox chimica che consenta la manipolazione in sicurezza del litio: la sua consegna è prevista per la metà di settembre. Pertanto non è stato possibile finora studiare la reazione chimica del litio con acqua. Tuttavia è stato possibile nel frattempo fare comunque una valutazione preliminare della bontà del processo di distillazione dell'ammoniaca. In questo caso l'ammoniaca è stata prodotta per reazione fra cloruro di ammonio ed idrossido di sodio; è stata poi distillata sotto flusso di 60 mL/min di argon e raccolta in soluzione acquosa contenente 7,2 g/L di acido bórico. Si è poi determinata la concentrazione nella soluzione finale di ammonio e confrontata con quella nella soluzione distillanda di partenza, nel caso di tre campioni, contenenti rispettivamente, circa 3,5, 2 ed 1 ppm di azoto. I risultati sono mostrati in Tabella 76.

Tabella 76. Risultati dell'analisi cromatografica su campioni all'inizio ed alla fine del processo di distillazione

Campione	Concentrazione iniziale di azoto (ppm)	Concentrazione finale di azoto (ppm)	Variazione relativa nel processo
0 (water)	< 0,003	0,03	
1	3,52	3,57	+ 1,48 %
2	1,88	1,74	- 7,5 %
3	0,906	0,878	- 3,03 %

La tabella mostra che c'è buon accordo fra i valori all'inizio ed alla fine del processo di distillazione: il massimo errore relativo (in valore assoluto) è pari al 7,5% circa. Ciò rappresenta un buon risultato, perché indica che le perdite di ammoniaca nel corso della distillazione sono assenti o molto basse, che nessun errore significativo inoltre è stato commesso durante le fasi di aggiunta, diluizione e trasferimento delle soluzioni; perciò assicura che l'analisi cromatografica riflette la situazione fisica iniziale del campione. Qualche altro esperimento verrà comunque compiuto nel prossimo futuro, nell'ottica di ottimizzare maggiormente l'intero processo e minimizzare ulteriormente le discrepanze fra i valori iniziali e finali di azoto misurati.

Una volta che la glovebox sarà disponibile in ENEA, sarà possibile anche studiare la reazione fra litio ed acqua, in termini di efficienza, cinetica e sicurezza. Sarà quindi possibile la validazione dell'intera procedura di analisi offline.

Va detto infine che la validazione della procedura complessiva si gioverà anche della possibilità di effettuare controlli incrociati sui risultati dell'analisi (Round Robin Analysis) in collaborazione col JAEA, partner del progetto IFMIF. Nei prossimi mesi infatti, ci sarà uno scambio di campioni tra JAEA ed ENEA ed il confronto fra i risultati ottenuti nei due laboratori, dove i campioni verranno analizzati con tecniche di analisi diverse, potrà dare indicazioni utili sulla validità delle tecniche impiegate, o suggerire le direzioni nelle quali una, l'altra od entrambe potranno essere ottimizzate.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/126.

b.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

Rapporto di fabbricazione del prototipo del target

Le particolari condizioni in cui il target di IFMIF si trova ad operare comportano l'esecuzione di operazioni di manutenzione preventiva al fine di assicurare la sicurezza di funzionamento di IFMIF. Il target infatti è esposto ad un intenso flusso neutronico che causa il deperimento delle proprietà meccaniche dei materiali che lo costituiscono e pertanto la sua sostituzione deve essere eseguita coerentemente con il tempo di vita di tale componente che attualmente risulta essere di 11 mesi. Inoltre, al fine di non compromettere l'operatività di IFMIF, oggi la disponibilità d'impianto richiesta è del 70%, il tempo massimo disponibile per la sostituzione di tale componente è di 168 ore (1 settimana). Questo è uno dei requisiti più stringenti per la manutenzione preventiva da eseguire in IFMIF.

In Europa è stato progettato un tipo di target, conosciuto come *target a baionetta*, che ha introdotto diverse innovazioni, ad esempio nel metodo di connessione utilizzato tra target e impianto a litio, che consentono il soddisfacimento di tale requisito. Il concetto di target Europeo è illustrato in Figura 346. Esso è stato progettato con il preciso scopo di rendere possibile la manutenzione del target, semplificando il più possibile l'esecuzione di tali operazioni, e di ridurre la quantità di materiali da smaltire.

Considerando l'ambiente in cui il target sarà installato, che presenta una dose gamma stimata di circa 10^5 Sv/h, tutte le operazioni di manutenzione devono essere eseguite per via remota. Le procedure di manutenzione per il ricambio dell'intero target assembly (TA) e per il suo ricondizionamento sono state già sviluppate in passato utilizzando simulazioni in realtà virtuale, ma la loro validazione richiede l'esecuzione di tutte le operazioni di manutenzione utilizzando i prototipi dei componenti da mantenere. A tal fine nel periodo di riferimento sono stati realizzati i prototipi del target assembly in scala e di una porzione della test cell che lo ospita.

Un'esaustiva e dettagliata descrizione del progetto del target europeo è fornita nel rapporto RdS/2013/130.

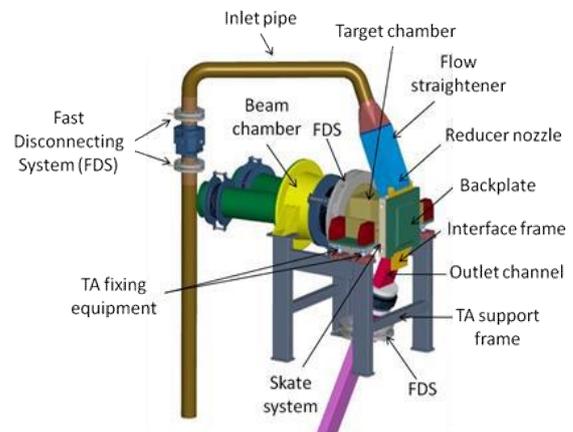


Figura 346. Modello 3D del target assembly europeo

Il prototipo del target di IFMIF è stato realizzato considerando lo specifico uso che ne sarà fatto e quindi solamente le parti rilevanti ai fini della specifica attività di manutenzione sono state realizzate in modo dettagliato. In particolare il prototipo del TA realizzato ha le seguenti caratteristiche:

1. il corpo del target è interamente realizzato in AISI 304;
2. il bersaglio a baionetta ed il relativo supporto d'interfaccia sul corpo del target sono stati realizzati secondo i disegni as-built forniti da ENEA. Quindi questi due componenti, fatto salvo il materiale, sono identici per forma e accuratezza di lavorazione a quelli che saranno installati in IFMIF;
3. le geometrie interne del target non rilevanti ai fini della manutenzione sono state semplificate, mentre quelle esterne sono coerenti con le dimensioni e la forma target stesso. Ad esempio il profilo dell'ugello di adduzione del litio non è stato realizzato;
4. il centro di massa del prototipo si trova nella stessa posizione di quello reale. Questa caratteristica è importante perché permette di prelevare e posizionare il prototipo senza forzare i sistemi di presa del componente;
5. la struttura di sostegno e posizionamento è stata progettata per mantenere in posizione perfettamente verticale il target;
6. i sistemi di centraggio e posizionamento del target sulla struttura sono stati realizzati secondo i disegni as-built forniti da ENEA. Tali sistemi sono stati progettati per garantire un'accuratezza di assemblaggio complessiva di $\pm 0,5$ mm;
7. tutte le connessioni del TA verso l'impianto e il beam sono realizzate per mezzo di sistemi di connessione rapida di tipo FDS. Due tipologie di connessione sono state realizzate: una per la connessione dell'ingresso basata su una catena commerciale prodotta dalla EVAC (Svizzera), mentre l'altra, che connette la sezione d'uscita del target, è stata realizzata utilizzando una catena prodotta dalla Garlock (Francia). Per il resto le due connessioni sono fornite delle stesse funzionalità e sistemi di sicurezza;

8. il sistema di tenuta di tutte le connessioni è basato su guarnizioni di tipo metallico della Helicoflex tipo HN-HNV));
9. le connessioni in contatto con litio fluente (tubi di ingresso ed uscita del target e il bersaglio rimovibile) sono state provviste di sistema di rilevamento fuga litio.

Il prototipo della sezione delle test cell invece è stato realizzato con l'obiettivo di eseguire le operazioni di manutenzione in un ambiente il più vicino possibile a quello reale in termini di geometria e spazi disponibile. La Figura 347 mostra il target assembly durante la realizzazione.

Per maggiori dettagli fare riferimento al rapporto RdS/2013/127.



Figura 347. Target assembly durante la realizzazione

Fabbricazione del sistema Fast Disconnecting System per la giunzione delle tubazioni da remoto e validazione delle procedure di manutenzione remotizzata

Un nuovo tipo di giunzione per tubazioni, chiamato Fast Disconnecting System (FDS), da utilizzare per il target di IFMIF è stato sviluppato e realizzato. Esso consente di connettere per via remota il target assembly alle tubazioni dell'impianto a litio e al condotto dell'acceleratore in un tempo molto inferiore rispetto alle connessioni flangiata standard (bullonate o saldate). Tale concetto di connessione è basato su una catena commerciale composta da una serie di cunei connessi per mezzo di maglie. Quando la catena viene serrata, per mezzo della vite di manovra, i cunei trasmettono sulle flange da accoppiare la forza richiesta dalla guarnizione per garantire la tenuta dell'accoppiamento. Nel caso dell'applicazione in IFMIF la tenuta è realizzata per mezzo di una guarnizione metallica della Helicoflex di tipo HN. La catena utilizzata per la realizzazione del prototipo dell'FDS è illustrata in Figura 348. Essa è basata su un prodotto commerciale realizzato dalla EVAC (Svizzera) a cui sono state apportate alcune modifiche per renderla compatibile per l'applicazione nel campo della manutenzione remotizzata.

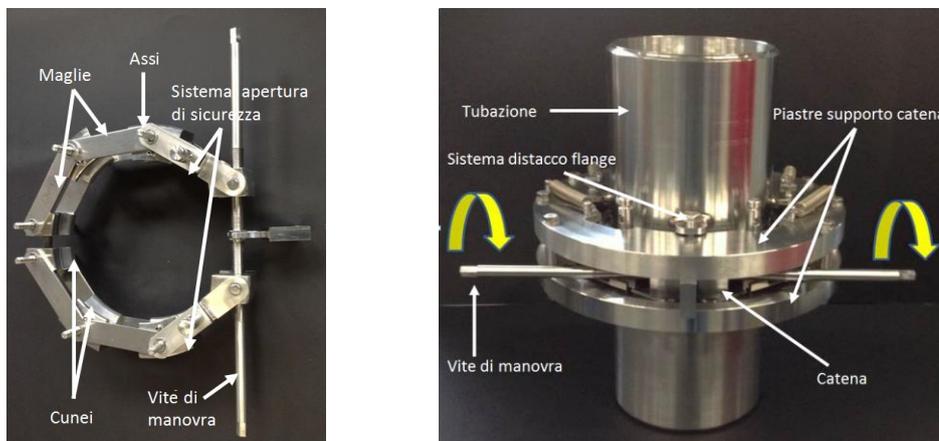


Figura 348. Catena della EVAC e prototipo del sistema FDS

La figura 348 mostra il prototipo FDS realizzato. Tale prototipo comprende:

1. la catena di chiusura delle flange completa di vite di manovra per l'apertura chiusura della stessa;
2. le piastre di supporto della catena: le piastre sono fornite di guide che vincolano la catena a seguire la traiettoria di chiusura/apertura dei cunei. Esse forniscono comunque la funzionalità di mantenimento della catena nella posizione corretta;
3. il sistema di distacco flange: poiché le flange sono in contatto con il litio è possibile che si verifichino fenomeni di incollamento tra le flange stesse. Infatti durante il passaggio del litio nelle tubazioni si può verificare che parte del litio penetri tra le due flange, che una volta raffreddato agisce come elemento di adesione. Il sistema consiste in una serie di bulloni che agiscono sul piatto di supporto superiore della catena;
4. il sistema di emergenza di apertura della catena in caso di bloccaggio della vite di manovra: in caso di bloccaggio della vite di manovra l'apertura della catena è garantita da due spine rimovibili. La forza richiesta per la rimozione di tali spine è di circa 100 N;

5. il sistema di rilevamento fuga litio: tale sistema è mostrato in Figura 349. Il sistema è costituito da un insieme di perline di materiale ceramico, che funge da isolatore, in cui passano due conduttori elettrici. Nel caso di fuga di litio i due conduttori vengono cortocircuitati generando così il segnale di allarme.
6. il sistema di supporto dell'intero FDS. La piastra inferiore di supporto della catena è vincolata, attraverso una serie di bullona, su un'altra piastra che è saldata al tubo inferiore. Nel caso di guasto della catena è possibile sostituire l'intero sistema FDS seguendo una semplice procedura: si apre la catena per mezzo delle spine rimovibili, quindi si rilascia l'FDS svitando i bulloni di collegamento tra la piastra di supporto catena e quella di supporto dell'FDS.



Figura 349. Sistema di rilevamento fuga litio

Sul prototipo realizzato sono stati eseguiti i primi test di remote handling. Tali test preliminari, quelli definitivi fanno parte della validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target assembly, hanno permesso di verificare: 1) la possibilità di aprire e chiudere la catena dell'FDS da remoto; 2) la possibilità di sostituire l'intero sistema; 3) la possibilità di aprire la catena in caso di bloccaggio della vite di manovra. I test eseguiti hanno avuto esito positivo.

Per maggiori dettagli fare riferimento al rapporto RdS/2013/128.

Progettazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF

Le operazioni di manutenzione remotizzata da eseguire per la rimozione del target o per il suo ricondizionamento richiedono l'impiego di diversi dispositivi progettati ad hoc. Nel caso del target assembly sono già disponibili diversi dispositivi idonei ad essere impiegati per la validazione delle operazioni di manutenzione, mentre altri sono in fase di realizzazione. In particolare, nel periodo di riferimento sono stati progettati due dispositivi da impiegare per la rimozione, installazione e posizionamento del target e del bersaglio rimovibile.

In Figura 350 è illustrato il telaio di clampaggio e sollevamento del target assembly. Esso comprende un telaio su cui sono assemblati quattro attuatori ad aria compressa che comandano quattro spine coniche. Queste ultime assicurano la connessione tra il telaio e i punti di presa del target assembly. Si tratta di un telaio avente una capacità di carico di 1,5 t (peso del target circa 0,9 t). Inoltre tale sistema è provvisto di sensori che segnalano le tre posizioni delle spine durante la

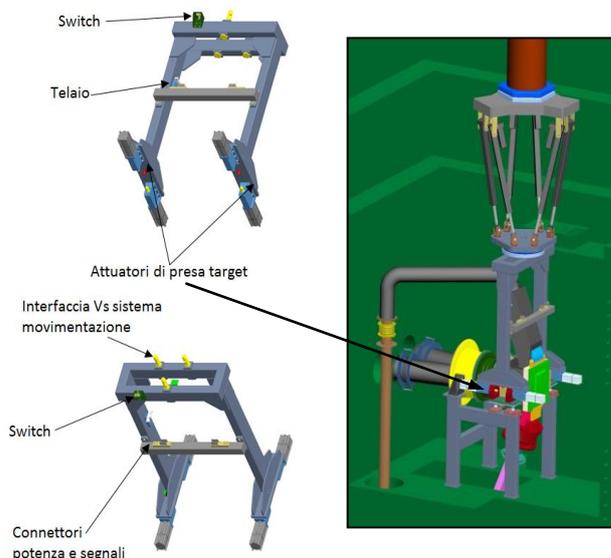


Figura 350. Modello 3D del sistema di sollevamento e clampaggio del target assembly

fase di connessione con il target: spine estratte, inserite e per esclusione la segnalazione delle spine in movimento. Il telaio è anche provvisto di sensori per la segnalazione del corretto posizionamento sul supporto di stoccaggio così come della segnalazione del corretto aggancio con i sistemi di movimentazione.

Il sistema di sollevamento e posizionamento del bersaglio rimovibile è mostrato in figura 351. Il principio di funzionamento del sistema è identico al precedente, a parte la collocazione dei quattro attuatori. La capacità di carico di tale sistema è di circa 0,25 t.

E' stata inoltre progettata la struttura di sostegno per i due sistemi quando non sono in uso. I due sistemi di presa per il target assembly e per il

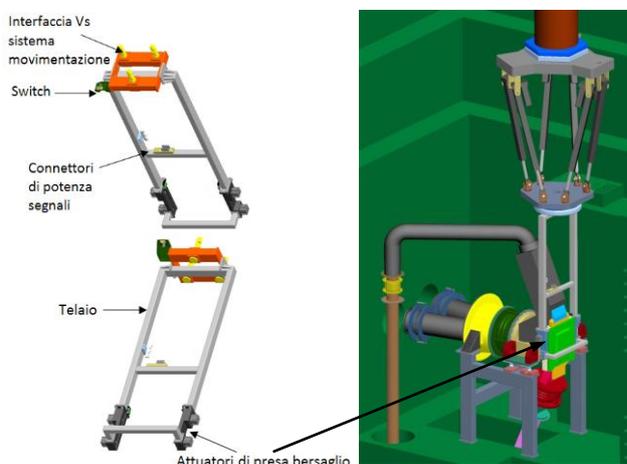


Figura 351. Modello 3D del sistema di sollevamento e posizionamento bersaglio rimovibile

bersaglio e la loro struttura di sostegno sono attualmente in fase di realizzazione. Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2013/129.

b.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target assembly per IFMIF

Progettazione finale del Target Assembly a baionetta completo di disegni

Nell'ambito della fase EVEDA (Engineering Validation and Engineering Design Activities) di IFMIF, l'ENEA è responsabile del design del sistema target a litio liquido nella versione europea basata sul concetto di backplate (BP) rimovibile a baionetta, che rappresenta una delle due opzioni previste in IFMIF (l'altra è quella basata sul concetto di target integrale sviluppato dal JAEA in Giappone).

Nel periodo coperto dalla presente annualità dell'Accordo di Programma MSE-ENEA, il lavoro di progettazione del target si è principalmente incentrato sui due seguenti aspetti:

- avanzamento e ottimizzazione del modello esistente, a partire dalla configurazione sviluppata nell'ambito del precedente PAR (2011) e descritta nel secondo rapporto tecnico (Design Description Document II, DDD-II) relativo alla conclusione della seconda fase delle attività di ingegneria di IFMIF (Engineering Design Activities, EDA) condotte in ambito europeo;
- analisi numeriche dettagliate in supporto alla citata attività di progettazione del TA. In particolare sono state condotte le analisi neutronica, termomeccanica e termoidraulica del target mediante qualificati codici numerici. In taluni casi ciò ha peraltro richiesto un preventivo lavoro di customizzazione dei codici stessi e/o del modello CAD di input.

Rispetto alla versione precedente sono state introdotte alcune modifiche e integrazioni, tra cui le più rilevanti sono elencate di seguito:

- è stato rivisto il tipo, il numero e il layout dei soffiotti di compensazione al fine di ottimizzarne la configurazione e il funzionamento,
- è stata parzialmente ridisegnata la zona del canale di uscita per tener conto delle modifiche introdotte dal JAEA (responsabile del design del circuito a litio) e semplificare le operazioni di sostituzione remotizzata del target (in particolare, la connessione flangiata obliqua è stata ricollocata in orizzontale per facilitare l'inserimento e la connessione del TA col canale di uscita del circuito a litio,)
- sono stati integrati i disegni CAD aggiornati dei tre FDS (Fast Disconnecting System) relativi alle connessioni meccaniche del TA con il loop a litio e il condotto dell'acceleratore;
- è stato introdotto il sistema di rilevazione di fughe di litio sulla backplate;
- sono stati implementati i sistemi di presa e ancoraggio del TA e della backplate per la loro movimentazione mediante i sistemi di remote handling;
- è stato realizzato il design dei principali tools di remote handling specifici per il TA e la BP e sono state definite, mediante simulazioni al calcolatore, le procedure per la manutenzione remotizzata del sistema. I dispositivi progettati includono:
 - un robot parallelo per la movimentazione del target e della BP;
 - un braccio robotico per le operazioni di precisione all'interno della test cell;
 - un frame per afferrare e trasportare la BP;
 - un frame per afferrare e trasportare il TA;
 - un bolting tool per avvitare/svitare le viti di manovra e i bulloni degli FDS e della BP;
 - un tool di cleaning per pulire le superfici dagli eventuali depositi di litio (flange degli FDS e frame d'interfaccia tra BP e target chamber).

Per quanto riguarda il supporto modellistico, è stato eseguito lo studio neutronico, termomeccanico e termoidraulico dell'intero target assembly relativamente all'ultima configurazione disponibile.

Di seguito viene riportata una breve sintesi del lavoro svolto per ciascuna delle suddette analisi.

Analisi neutronica

L'analisi neutronica ha comportato lo svolgimento di diversi tipi di calcoli, tra cui in particolare:

- Calcoli di trasporto di neutroni e gamma per la determinazione della distribuzione delle principali grandezze "prompt" necessarie ai fini della progettazione ovvero:
 - densità di potenza termica depositata nel sistema in condizioni di beam-on;
 - danneggiamento neutronico in termini di tasso annuo di dpa (displacement per atom);

- produzione di gas (H₂ e He dovuto alle interazioni nucleari dei neutroni coi nuclidi dei materiali strutturali).
- Calcoli di attivazione per la determinazione di:
 - densità di potenza termica di decadimento ($\beta+\gamma$) a vari istanti temporali dopo lo shutdown;
 - attività specifica e mappe di *contact dose rate* per valutazioni inerenti la safety e la gestione dei rifiuti radioattivi.
- Calcoli di trasporto dei deutoni per la determinazione della distribuzione di densità di potenza termica depositata nel litio.

I calcoli di trasporto sono stati eseguiti mediante il codice Monte Carlo MCNP-5 ver.1.6 compilato in versione parallela con la sorgente neutronica McDeLicious-11 fornita dal KIT. I calcoli di attivazione sono stati condotti mediante il pacchetto EASY-2007 (codice FISPACT+ librerie di attivazione EAF 2007). Il trasporto dei deutoni in litio è infine stato valutato mediante il codice MCUNED in grado di trattare le sezioni d'urto delle reazioni indotte dai deutoni.

Le mappe di densità di potenza termica nucleare nel TA sono state utilizzate come dati di input per i calcoli di termomeccanica. La distribuzione di densità di potenza termica nel litio è stata fornita in ingresso al codice di termoidraulica.

Una significativa parte del lavoro, svolta a monte dei calcoli veri e propri, è consistita nella conversione dei file CAD disponibili in formato STEP in un formato che potesse essere importato direttamente dal codice MCNP. Ciò è stato fatto mediante l'utilizzo dei software di interfaccia McCad (sviluppato in Germania dal KIT) e MCAM (sviluppato in Cina da FDS) dopo un opportuno lavoro di revisione di alcune delle caratteristiche geometriche dei files STEP di input.

A titolo di esempio, i risultati dei calcoli delle diverse grandezze nucleari *prompt* mediate sull'area del footprint sono riportate in Tabella 77.

Tabella 77. Valori medi delle grandezze nucleari calcolate sul footprint

Flusso neutronico (n/cm ² /s)	1,36E+15
Flusso gamma (n/cm ² /s)	3,92E+14
Potenza depositata dai neutroni (W/cm ³)	1,66E+01
Potenza depositata dai gamma (W/cm ³)	1,55E+01
Displacement Per Atom (dpa/fpy)	5,67E+01
Produzione di H ₂ (appm/fpy)	2,97E+03
Produzione di He (appm/fpy)	7,28E+02

Analisi termomeccanica

Al fine di valutare le prestazioni termomeccaniche del sistema, è stato predisposto un modello agli elementi finiti dell'intero TA comprensivo di tutti i carichi meccanici e termici agenti su di esso. Il modello è stato quindi implementato mediante un qualificato pacchetto software con cui è stato simulato il comportamento del sistema in condizioni stazionarie, prendendo in considerazione sia lo scenario nominale che quello di design.

In questo modo è stato possibile determinare le distribuzioni di temperatura, spostamento e sforzo all'interno di tutto il TA, ottenendo informazioni rilevanti anche ai fini di un'eventuale ottimizzazione del design del sistema. In particolare, si è osservato che:

- la temperatura massima raggiunta nel TA e nella BP è di circa 475 e 400 °C rispettivamente (Figura 352), e quindi è ben collocata all'interno della finestra di utilizzo ottimale (ritenuta approssimativamente coincidente con l'intervallo 350 -550 °C) del materiale strutturale considerato (EUROFER);
- lo spostamento massimo della backplate verso il modulo ad alto flusso situato dietro di essa è risultato inferiore alla dimensione nominale (2 mm) del gap esistente tra i due componenti, il che porta ad escludere il loro contatto durante il funzionamento normale del sistema;
- lo stato di stress indotto nel TA dai carichi primari è ampiamente al di sotto dei limiti ammissibili. Tuttavia, l'inclusione dei carichi secondari, in concomitanza con la riduzione della duttilità del materiale strutturale sotto irraggiamento, determina una distribuzione di stress che evidenzia alcune zone critiche nella sezione mediana della backplate, qualora esse siano valutate sulla base delle norme di progettazione SDC-IC di ITER. Ciò potrebbe suggerire la necessità di irrobustire lo spessore della backplate in tali zone. Va comunque rilevato che poiché le normative SDC-IC non includono al momento regole di progettazione specifiche per l'EUROFER, esse

risultano probabilmente troppo conservative essendo tipicamente basate sul comportamento dell'acciaio inossidabile austenitico. A questo proposito, è quindi auspicabile una analisi più approfondita eventualmente alla luce delle più aggiornate norme RCC-MRx francesi per le quali è attualmente previsto l'inserimento di alcuni criteri di progettazione specifici per l'EUROFER.

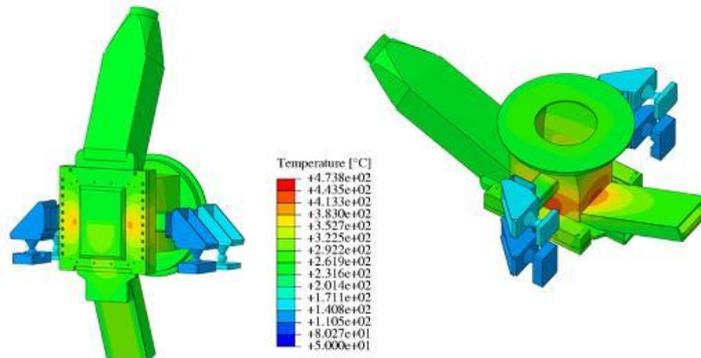


Figura 352. Distribuzione di temperatura nel TA

Analisi termoidraulica

Per quanto concerne l'analisi termoidraulica, sono state eseguite simulazioni mediante il codice commerciale FLUENT al fine di determinare il comportamento termofluidodinamico del flusso di litio in condizioni stazionarie ($v=15$ m/s; $T=250$ °C all'ingresso del nozzle). In particolare, è stato utilizzato un modello turbolento $k-\epsilon$ a due fasi (Volume of Fluid, VoF) con pressione imposta in uscita pari a quella presente all'interno della camera del target (10^{-3} Pa). Il dominio di calcolo comprende l'ugello, la backplate e il canale di uscita. Il riscaldamento dovuto ai deutoni è stato simulato mediante un termine di sorgente volumetrica nell'equazione dell'energia la cui distribuzione è stata ricavata nell'ambito dell'analisi neutronica.

Quali risultati delle simulazioni sono state ottenute le distribuzioni di velocità, temperatura e pressione all'interno del fluido (Figura 353). In particolare, il calcolo ha evidenziato che:

- lo spessore del jet aumenta di circa 1,5 mm dall'uscita del nozzle alla zona del footprint, valore solo leggermente al di sopra del limite richiesto dalle specifiche tecniche di IFMIF (± 1 mm nella zona del footprint);
- la pressione all'interno del litio aumenta gradualmente per effetto della forza centrifuga indotta dalla curvatura della backplate fino al suo valore massimo di circa 12 kPa, confermando perciò l'adeguatezza del profilo a curvatura variabile sviluppato dall'ENEA e adottato nel design della backplate;
- la temperatura massima raggiunta nel litio è pari a circa 400 °C che viene raggiunta in una sezione leggermente a valle dell'asse del beam.

Per maggiori dettagli fare riferimento al rapporto RdS/2013/130.

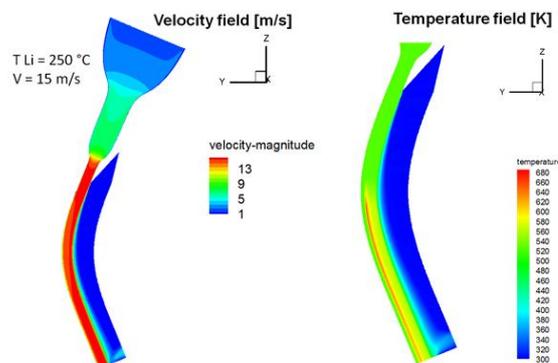


Figura 353. Distribuzione di velocità e temperatura nel litio

c. Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)

L'attività per IFERC prevede lo sviluppo e la caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di carburo di silicio e la loro utilizzazione come componenti funzionali e strutturali.

c.1 Realizzazione di componenti in SiC/SiC da utilizzare come componenti strutturali e funzionali

Il composito ceramico SiCf/SiC rappresenta un interessante materiale per un possibile utilizzo sia come materiale strutturale, sia come materiale funzionale dei reattori a fusione. Questo tipo di utilizzo richiede la definizione di procedure per la realizzazione del materiale composito con particolare riferimento allo sviluppo di cicli produttivi che permettano l'ottenimento di componenti meccanici di varie geometrie. A tal fine la FN è stata incaricata di realizzare pannelli di spessore 3, 4 e 5 mm e tubi di piccolo diametro ed, inoltre, di sviluppare cicli produttivi per la realizzazione di prismi cavi a sezione quadrata di grande spessore e con lato di almeno 100 mm. Utilizzando materiali ottenuti nelle precedenti annualità si sono progettati e realizzati componenti meccanici che saranno utilizzati nel forno destinato alla caratterizzazione del composito ceramico SiCf/SiC in litio piombo liquido (Subtask c.2).

Al fine di studiare l'effetto dell'irraggiamento γ sulle proprietà chimico-fisiche del composito SiCf/SiC, FN ha anche condotto test di irraggiamento su 10 campioni di detto materiale. Il lotto dei campioni è stato diviso in tre gruppi di tre campioni che sono stati irraggiati con tre diversi valori di dose assorbita mentre il restante dei dieci campioni, non sottoposto ad irraggiamento, ha costituito il campione di riferimento. Le successive caratterizzazioni chimico-fisiche permetteranno di valutare le modifiche indotte nel materiale in esame dall'irraggiamento gamma.

Tali attività sono descritte nel rapporto RdS/2013/189.

c.2 Progettazione e costruzione di una camera sperimentale per prove di erosione-corrosione ad alta temperatura (1000°C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo

Al fine di utilizzare il composito ceramico SiCf/SiC come materiale funzionale nei componenti del blanket liquido dei reattori a fusione diventa importante studiare i fenomeni di erosione e corrosione tra questo materiale ed il piombo-litio liquido.

Nell'annualità si è completata la realizzazione del forno destinato alla caratterizzazione del composito ceramico SiCf/SiC in piombo-litio liquido. E' stata ultimata la progettazione e la realizzazione del sistema di controllo in grado di gestire le prove sperimentali anche tenendo conto dei possibili malfunzionamenti che vista la lunga durata della prova, circa 3000 ore, rappresentano un importante parametro progettuale. In particolare, il sistema di controllo è in grado di gestire e coordinare tutti i sistemi progettati per la corretta esecuzione delle prove sperimentali: sistema del gas inerte, sistema di riscaldamento della lega piombo-litio, sistema di raffreddamento della parte esterna del forno, sistema di movimentazione del campione e sistema predisposto alla sicurezza operativa dell'impianto.

Tali attività sono descritte nel rapporto RdS/2013/190.

d. FAST il nuovo esperimento satellite europeo

L'attuale progetto per FAST prevede la costruzione, possibilmente in un sito ENEA, di una macchina tokamak ad alto campo magnetico, elevata corrente di plasma e dimensioni compatte (raggio maggiore di 1,8 m) ed include la realizzazione di impianti per le alimentazioni elettriche e per il riscaldamento del plasma con radiofrequenza (40 MW) ed iniezione di neutri. Il nucleo centrale della macchina comprende 18 bobine per il campo magnetico toroidale, 6 bobine interne per il trasformatore, 6 bobine esterne per il campo magnetico poloidale, una complessa struttura di sostegno meccanico ed una camera da vuoto toroidale in cui sono inseriti i componenti esposti al plasma, tra cui il divertore e la prima parete, che devono poter essere sostituiti da remoto a causa dell'attivazione nucleare dei materiali successiva al funzionamento della macchina. Tutte le bobine sono realizzate in rame e raffreddate con elio gassoso a 30 K, per ridurre la resistività elettrica, mentre i componenti esposti al plasma sono raffreddati con acqua pressurizzata. Il nucleo centrale della macchina è racchiuso in un criostato metallico sotto vuoto per garantirne l'isolamento termico.

La cooperazione tra ENEA, CREATE ed LTCalcoli, con le rispettive differenti competenze, ha permesso di condurre lo studio delle topologie magnetiche innovative "Snow Flake" e "Super-X" e dei relativi adattamenti richiesti alla macchina FAST, evidenziandone limiti e vantaggi sia fisici che tecnologici.

d.1 Attività su un nuovo concetto di divertore compatibile sia con la topologia magnetica standard "Single Null" che con quella innovativa "Snow Flake"

La linea di attività è indirizzata alla progettazione, al disegno ed alla relativa verifica strutturale di un innovativo concetto di divertore (Figura 354) per FAST utilizzabile, senza variazioni della geometria, sia con la configurazione magnetica standard "X-point" con Singolo Nullo (SN) sia con quella "Snow Flake" (SF) con carico termico ridotto

(Figura 355), capace quindi di rendere possibile un confronto sperimentale diretto delle proprietà di queste due topologie, nella stessa macchina e nelle stesse condizioni sperimentali. Per valutare l'effettivo potenziale di questa configurazione nel risolvere il problema dell'energia termica incidente dal plasma sul divertore, cruciale nelle macchine ad alte prestazioni come FAST e fondamentale nel futuro reattore a fusione, sono state studiate in dettaglio la configurazione di plasma SF e la relativa fisica dell'interazione tra bordo e parete del plasma.

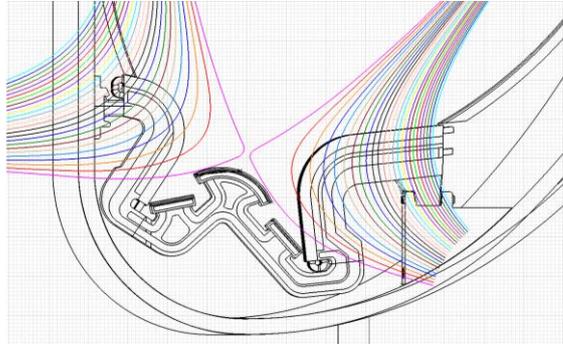


Figura 354. Divertore compatibile con le configurazioni SN e SF, sono mostrate le linee di flusso SF

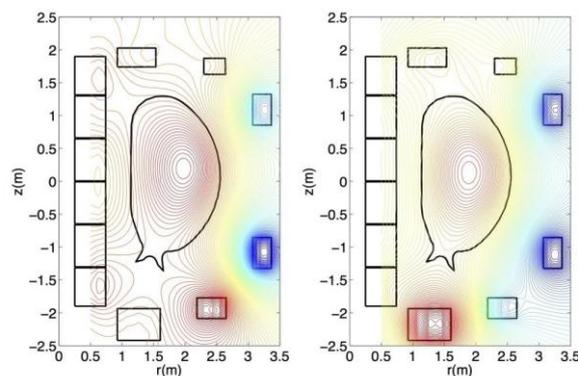


Figura 355. Confronto tra le linee di flusso nelle configurazioni SF (a sinistra) ed SN (a destra)

Il divertore in una macchina tokamak è il componente dedicato allo smaltimento della maggior parte del carico termico prodotto dal plasma e dai riscaldamenti ausiliari. Per questo motivo è una delle parti più critiche del progetto e può essere considerato un esperimento a sé stante per quanto riguarda lo sviluppo dei materiali, la progettazione di differenti configurazioni magnetiche del plasma ed il disegno di differenti geometrie del divertore stesso. Il divertore, oltre ad essere in grado di sostenere altissimi carichi termici per periodi prolungati di tempo, deve poter essere sostituibile, per necessità sperimentali o di sostituzione per usura, tramite sistemi di manutenzione completamente da remoto, a causa dell'attivazione dei materiali durante il funzionamento della macchina. Pertanto, una parte importante delle attività sul nuovo concetto di divertore è stata rivolta alla progettazione dei supporti meccanici, che devono essere tali da permettere una sostituzione relativamente facile e veloce dei moduli del divertore, la progettazione dei manipolatori da remoto, la verifica, tramite sistemi di realtà virtuale in 3D, delle interferenze con le strutture della macchina durante la movimentazione del divertore.

La configurazione SF si è rivelata molto efficace nella riduzione della potenza incidente sulle piastre del divertore, con un fattore di riduzione di circa 5, maggiore di quanto previsto da semplici considerazioni topologiche e suggerente un possibile ruolo svolto dall'accumulo delle particelle neutre nello spazio di fronte alle piastre stesse. Il guadagno conseguito con questo importante risultato ha giustificato una revisione della camera per il plasma ed una completa riprogettazione del divertore, che è stato ridisegnato, in formato CATIA5, in modo da essere compatibile contemporaneamente sia con la configurazione SF che con quella SN. E' stata quindi eseguita, modellando con ANSYS la geometria 3D di tutte le strutture conduttive circostanti (Figura 356), una valutazione accurata dei carichi EM durante le fasi più critiche dei peggiori eventi di terminazione anomala del plasma nello scenario con le massime prestazioni. Tali carichi sono stati utilizzati per

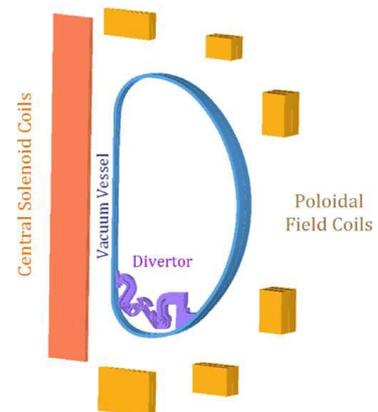


Figura 356. Strutture conduttive nel modello EM

l'analisi strutturale del divertore, condotta sempre con ANSYS (Figura 357), che ha permesso di ottimizzare la struttura portante e i supporti (Figura 358) fino ad ottenere stress massimi inferiori ai limiti dei materiali ed in accordo con i criteri di progetto. Sono state inoltre eseguite le verifiche termo fluidiche del raffreddamento e la verifica, con sistemi di realtà virtuale in 3D, dei vincoli e delle interferenze con gli altri componenti durante il montaggio, smontaggio e trasporto controllati da remoto del divertore.

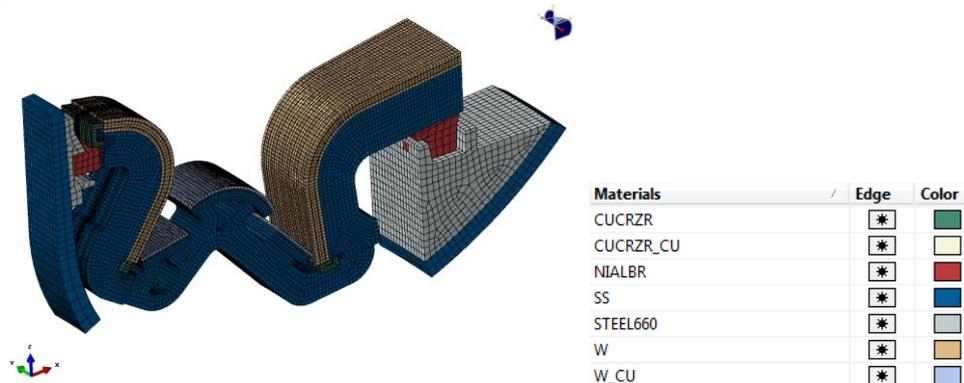


Figura 357. Mesh strutturale 3D per il divertore

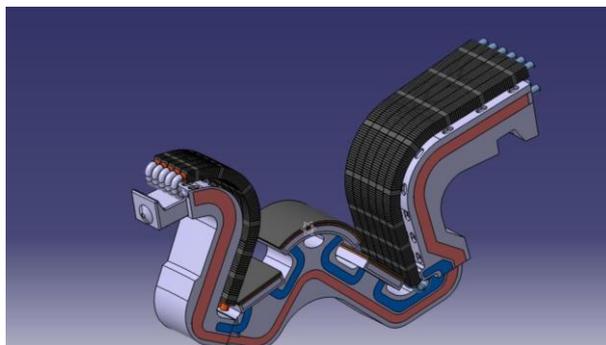


Figura 358. Progetto finale del nuovo concetto di divertore dopo le ottimizzazioni strutturali e di remote handling

I deliverables con la descrizione dettagliata delle attività, svolte congiuntamente da CREATE, LTCalcoli (subcontraente di CREATE) ed ENEA, e dei risultati raggiunti nell'attività sono stati raggruppati, per facilitarne la comprensione integrando i vari aspetti fisici e tecnologici, nel singolo rapporto RdS/2013/191.

d.2 Attività di studio concettuale della configurazione di plasma di tipo "Super X" e progettazione preliminare di un tokamak derivato da FAST e compatibile con questa topologia magnetica

Questa linea di attività è stata indirizzata allo studio concettuale di fattibilità di una configurazione magnetica innovativa di tipo "Super X" (SX) in un tokamak simile a FAST per rapporto di aspetto, dimensioni e disposizione delle bobine di campo magnetico.

Gli studi sulla configurazione SX hanno evidenziato i suoi potenziali vantaggi di disaccoppiamento delle caratteristiche del plasma nel centro (bulk) da quelle della zona del divertore (power exhausting region), grazie alla sua proprietà di dissipare la potenza termica in una zona molto lontana dal plasma stesso. Lo studio delle modifiche necessarie, alla camera per il plasma ed al numero e disposizione delle bobine di campo poloidale di FAST, per poter realizzare una configurazione SX ha permesso di effettuare il disegno concettuale (Figura 359) di una macchina con le dimensioni ed il rapporto di aspetto di FAST ($R/a \approx 3$). Per questa macchina sono stati progettati gli equilibri di plasma di riferimento per le configurazioni SN, SF ed SX (Figura 360) e sono state valutate, per questi equilibri, le caratteristiche del plasma oltre che le correnti e le forze nelle bobine di campo poloidale. Tuttavia la configurazione che è stato possibile realizzare in tale macchina beneficia solo parzialmente di questi vantaggi e l'incremento di complessità tecnica e di costi derivante dall'incremento di volume magnetico rispetto a quello del plasma non risulta quindi giustificabile con i vantaggi ottenibili. Infatti la configurazione SX, pur potendo ridurre in linea di principio il carico termico sullo strike point esterno, lascia invariato il problema sul lato interno della macchina.

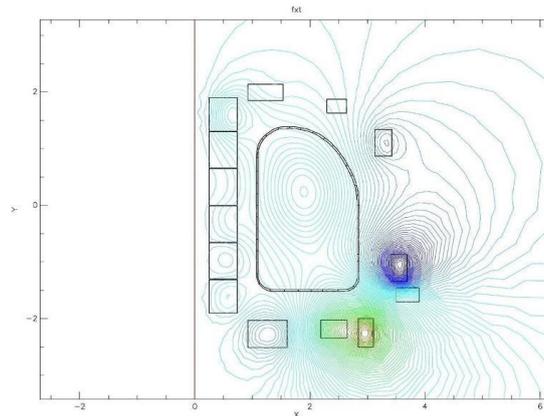


Figura 359. Disegno concettuale di un tokamak derivato da FAST con camera per il plasma e bobine di campo poloidale modificate, sono mostrate le linee di flusso per l'equilibrio SX

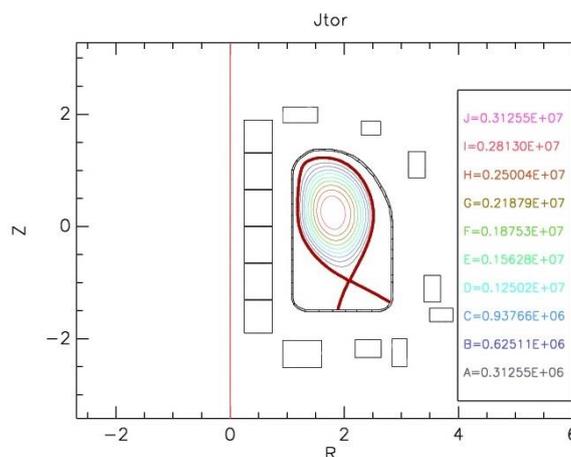


Figura 360. Profilo della corrente toroidale di plasma per l'equilibrio SX nel tokamak derivato da FAST

I deliverables con la descrizione dettagliata delle attività, svolte congiuntamente da CREATE, LTCalcoli (subcontraente di CREATE) ed ENEA, e dei risultati raggiunti nell'attività d.2 sono stati nel Rapporto RdS/2013/258

Nessuna variazione programmatica o di contenuto tecnico rispetto alle previsioni del PAR 2012 è intervenuta durante lo svolgimento delle attività comprese nell'Obiettivo d (FAST II nuovo esperimento satellite europeo). Si evidenzia tuttavia che i risultati ottenuti, come discusso nel relativo Rapporto RdS/2013/191, hanno reso prioritario l'impegno sulla linea d.1. Pertanto, le attività di progettazione del nuovo concetto di divertore compatibile con le configurazioni SF ed SN (deliverable d.1) sono state condotte con un dettaglio maggiore di quello preventivato. Le attività di studio della configurazione SX in una macchina derivata da FAST (linea d.2) hanno invece evidenziato la non immediata applicabilità di tale soluzione, che pertanto è stata analizzata al solo livello concettuale come previsto dal PAR 2012.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

a. Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

Per l'espletamento *del Subtask a.1* è stata coinvolta la società del Gruppo Malacalza, **ASG Superconductors** con sede a Genova, a cui ENEA ha affidato la realizzazione delle 9 bobine di campo toroidale della macchina JT-60SA. La società è impegnata anche nella realizzazione degli avvolgimenti delle bobine di campo toroidale della macchina sperimentale ITER. La scelta di ASG è stata dettata oltre che dalla sua unicità nel panorama industriale italiano anche dall'enorme esperienza acquisita nel corso della sua più che ventennale attività di realizzazione di elettromagneti superconduttivi, che implica l'adozione di numerosi processi speciali come le tecniche di avvolgimento, di impregnazione e di saldatura della bobina nella cassa di contenimento. ASG è attualmente impegnata oltre che nella costruzione dei magneti superconduttivi di JT-60SA anche nella realizzazione dei

magneti superconduttivi di ITER di cui JT-60SA rappresenta un completamento in vista della realizzazione del primo tokamak dimostrativo DEMO.

Per l'espletamento *del Subtask a.2* è stata coinvolta la **società Walter Tosto**, un'azienda leader a livello mondiale nella caldareria, che produce apparecchi ad alto livello tecnologico per i settori Oil and Gas, Petrolchimico, Power Generation e alimentare/farmaceutico. La società si è aggiudicata la fornitura delle 18 casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA. La società è inoltre impegnata, insieme ad **Ansaldo Nucleare e Mangiarotti**, nella fornitura di 7 dei 9 settori del vacuum vessel di ITER.

Per l'espletamento *del Subtask a.3* è stata coinvolta la Ditta **Energy Technology srl** che possiede un vasto bagaglio di esperienze in applicazioni di elettronica di potenza su apparati sperimentali e su sistemi dotati di interruttori statici. L'Energy Technology srl ha rilevato la Ditta O.C.E.M. con cui l'ENEA ha avuto in passato proficui contatti. L'Energy Technology ha conservato la struttura, la dotazione strumentale e l'organico del personale della Ditta O.C.E.M. Quest'ultima ha stipulato con ENEA contratti per impianti della macchina FTU ed ha partecipato al progetto di massima di sistemi di alimentazione di macchine proposte da ENEA.

Per l'espletamento *del Subtask a.4* il contratto per la fornitura di otto alimentatori e sei trasformatori per JT- 60SA PFC PS (CS1, CS2, CS3, CS4, EF1 e EF6 PS e le due FPPC PS) è stato assegnato da ENEA al fornitore industriale **POSEICO – JEMA** in RTI, che possiede un vasto bagaglio di esperienze in applicazioni di elettronica di potenza. Sia POSEICO che JEMA hanno grande esperienza nel campo dell'elettronica di potenza e degli alimentatori. La POSEICO focalizza la sua esperienza su dispositivi a semiconduttore (diodi, tiristori GTO e IGBT) sistemi di raffreddamento (innovativi e integrati del dissipatore di calore) e sui convertitori statici (raddrizzatori e inverter principalmente per il sistema ferroviario e trazione elettrica). La JEMA focalizza la sua esperienza in alimentatori per alte correnti e alte precisioni per applicazioni di fisica nucleare e di fusione nucleare ed è già coinvolta in diversi progetti internazionali, come: MAST, JET, JT60SA (CEA contratto) e STELLERATOR. Le attività di gestione tecnica e di qualità iniziarono immediatamente dopo l'aggiudicazione del contratto. Il contratto di appalto è basato su specifiche tecniche e di gestione della qualità sviluppate da ENEA con la stretta collaborazione di F4E e JAEA. Le caratteristiche del sistema e i documenti di specifica tecnica e di gestione della qualità sono stati accuratamente analizzati e discussi, durante il kick-off meeting e i successivi.

b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

Tutte le attività di progettazione e realizzazione relative all'obiettivo sono state condotte in collaborazione con le Università e con le seguenti ditte:

1. **Ferretti SRL** (Marzabotto-BO) a cui è stata affidata la realizzazione dell'impianto LiFus6 completo del circuito di purificazione. Tali attività fanno parte dei Subtask b.2 e b.3;
2. **Telerobot SPA** (divisione di Savona) a cui è stata affidata la progettazione e realizzazione del prototipo del target assembly per le prove di validazione previste dal Subtask b.4. Inoltre la divisione di Genova ha progettato tutti i dispositivi di remote handling previsti dai Subtask b.4 e b.5;
3. **Tagliaferri srl** (Calenzano) ha realizzato il prototipo del Fast Disconnecting System previsto dal Subtask b.4;
4. **L'Università di Palermo** ha eseguito l'indagine termomeccanica in regime transitorio del target assembly e quella per l' FDS previste nell'ambito dei Subtask b.4 e b.5 .
5. **L'Università di Firenze** ha invece eseguito l'ottimizzazione del metodo per la determinazione delle impurezze di azoto in litio.

c. Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)

Nell'ambito dell'obiettivo c, lo sviluppo della procedura per la realizzazione di materiali compositi ceramici in SiCf/SiC basato sulla tecnologia CVI (Chemical Vapor Infiltration) è stato realizzato dalla ditta **FN (Nuove tecnologie e servizi avanzati)**. Il lavoro è consistito nella messa a punto di un processo che prevede la realizzazione di preforme, la successiva deposizione di un interfase di carbonio e quindi l'esecuzione di successivi cicli di infiltrazione per la densificazione delle preforme. Una volta ottenuti questi materiali la ditta FN ha eseguito una loro caratterizzazione chimico-fisica ed ha, inoltre, sviluppato tecniche di lavorazione meccanica per l'ottenimento di componenti funzionali e strutturali.

Altre attività hanno riguardato la costruzione del forno per la caratterizzazione del composito ceramico SiCf/SiC in litio piombo liquido è stata eseguita presso la ditta Isolceram specializzata nella progettazione e costruzione di apparati per l'industria e la ricerca scientifica.

d. FAST il nuovo esperimento satellite europeo

Alle attività dell'obiettivo hanno contribuito, oltre all'ENEA, in qualità di subcontraenti il **Consorzio CREATE** - Consorzio di Ricerca per l'Energia e le Applicazioni Tecnologiche dell'Elettromagnetismo (studio concettuale, progettazione, disegno, verifiche strutturali e sistema di manutenzione remota) e **la Società L.T. Calcoli** (consulente del CREATE per la progettazione, le analisi EM e le verifiche strutturali).

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Il Piano d'Azione Europeo per l'Efficienza Energetica 2011 (PAEE) rimarca il ruolo dell'efficienza energetica come strumento imprescindibile di riduzione dei consumi nell'ambito dei Paesi Membri, nel raggiungimento dell'obiettivo del -20% al 2020 e al fine di avviare un uso efficiente delle risorse. In parallelo, il Piano d'Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili (PAN) fornisce ulteriori indicazioni a favore dell'efficienza energetica, come presupposto indispensabile per il raggiungimento degli obiettivi in materia di energie rinnovabili e riduzione della CO₂.

L'impegno particolarmente intenso necessario per raggiungere tali obiettivi richiede efficaci politiche energetiche che da un lato facilitino lo sviluppo di tecnologie, processi, prodotti e servizi a ridotto consumo di energia e dall'altro permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia in modo da ridurre i consumi attraverso l'acquisto consapevole e informato di prodotti e servizi eco-efficienti e il loro corretto uso.

La nuova direttiva europea sull'efficienza energetica (27/2012/CE), impone lo sviluppo tra gli Stati Membri delle potenzialità del teleriscaldamento e teleraffrescamento come strumento efficace di riduzione dei consumi energetici. Nei commi introduttivi si fa esplicito riferimento alla necessità di evidenziare i potenziali di tali infrastrutture e di implementare strumenti di gestione per l'uso ottimizzato delle reti e degli impianti di produzione, anche a livello locale.

Nel settore civile, residenziale e non, il mercato dispone di diverse tecnologie di particolare interesse per il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio/impianto, ma è necessario che si consolidino e diffondano anche altre tecniche tali da rendere gli impianti energeticamente efficienti, grazie anche allo sviluppo di strumenti di calcolo validi con modelli matematici sufficientemente evoluti e di logiche di regolazione e controllo; inoltre, il diffondersi delle sorgenti luminose a LED e OLED comporta diverse attività di ricerca per aumentare l'efficienza energetica nell'illuminazione artificiale e in altre realtà ad essa collegate, sia sulla produzione della luce, sia sul suo utilizzo.

Le tecnologie che nel settore dell'industria manifatturiera italiana mostrano elevati potenziali di risparmio energetico nel medio periodo riguardano la generazione del freddo, queste sono orientate in particolare al miglioramento delle caratteristiche di isolamento termico e degli spessori isolanti dei sistemi refrigeranti mediante l'impiego di nano-tecnologie e nuovi materiali e più in generale allo sviluppo di strumenti che mirano alla promozione di prodotti più performanti nel mercato.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale del progetto consiste nello sviluppo di strumenti e metodi che mirano al miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di stimolare la circolazione di prodotti più performanti. In tale contesto il panorama degli stakeholder potenzialmente interessati a tale sviluppo è piuttosto complesso e caratterizzato da differenti tipicità e requisiti, per questo motivo si è pensato di articolare il progetto attraverso quattro macro-obiettivi di attività:

- a. Reti di poligenerazione distribuita
- b. Gestione ottimale reti di edifici
- c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione
- d. Tecnologie per l'industria del freddo.

Le attività di questo progetto costituiscono la base per l'applicazione di soluzioni tecnologiche e lo sviluppo di strumenti di governance atti a favorire il consenso verso tali strategie e la loro diffusione capillare. E' evidente che, la disponibilità di poter usufruire di informazioni e soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica nei settori individuati dagli obiettivi elencati è un fattore di cui beneficia il sistema Paese, in generale, e l'utente finale, in particolare.

Nei precedenti piani triennali sono state svolte attività che hanno fornito soluzioni per il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio-impianti attraverso lo sviluppo di interventi di tipo sistemico, quali: la definizione di linee guida e di benchmark di riferimento per la eco-progettazione dei componenti di uso diffuso, l'aggiornamento della normativa, lo sviluppo e qualificazione di tecnologie innovative e loro diffusione attraverso la realizzazione di progetti dimostrativi, l'informazione e il trasferimento tecnologico verso società di servizi e utenti finali.

Inoltre, sono state svolte attività di ricerca sui fabbisogni e consumi energetici del sistema edificio-impianto, l'applicazione dimostrativa di soluzioni tecnologiche avanzate per la razionalizzazione dei consumi, lo sviluppo di componenti innovativi e le nuove attività sulle tecnologie per l'illuminazione pubblica. In particolare, per quanto attiene al settore civile sono state prodotte linee guida e indici di riferimento per il legislatore, valutazione dei consumi di significative tipologie di edifici, sviluppo di modelli di calcolo, caratterizzazione di componenti dell'involucro edilizio per schermaggio e illuminazione naturale.

In relazione al risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica, sono state condotte attività di ricerca su prodotti innovativi (LED), che hanno prodotto prototipi, validati con campagne di test sperimentali, sviluppo di strumenti per la progettazione ottimizzata di set urbani e sistemi di controllo intelligente, realizzazione di sistemi pilota di illuminazione in situazioni applicative complesse e ripetibili.

Infine, sono state effettuate attività trasferimento tecnologico verso realtà territoriali e di supporto all'attività prenormativa e normativa. A seguito delle attività svolte, sono stati pubblicati sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea vari regolamenti delegati che definiscono la nuova etichetta per i principali apparecchi domestici e una lunga serie di regolamenti di ecodesign, che definiscono i criteri minimi per l'immissione dei prodotti sul mercato comunitario, e quindi nazionale e che coprono oltre ai grandi elettrodomestici prima citati una serie di prodotti industriali (motori elettrici, i ventilatori).

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Reti di poligenerazione distribuita

In tutti settori economici le potenzialità di contenimento dei consumi energetici dei dispositivi di poligenerazione distribuita derivano prevalentemente dalla riduzione delle "perdite" energetiche legate al vettoramento dell'energia ad elevata distanza ed ai frequenti funzionamenti a carichi parziali tipici degli impianti di taglia elevata ed esse possono contribuire in maniera considerevole agli ambiziosi obiettivi della direttiva EU 20-20-20.

Proprio per questo motivo la nuova Direttiva europea sull'efficienza energetica²⁰ contiene un importante articolo dedicato alla promozione dell'efficienza energetica per il riscaldamento e il raffrescamento come strumento per evitare gli sprechi di energia termica, opportunità di investimento nella cogenerazione, nel teleriscaldamento e teleraffrescamento, ma anche per l'innovazione dell'approccio di policy adottato, che introduce l'obbligo di adottare tali tecnologie a patto che sia svolta un'analisi costi-benefici volta a dimostrarne la loro effettiva convenienza economico-sociale.

In tale contesto si inseriscono le attività relative al presente obiettivo che mirano allo sviluppo di strumenti per la simulazione e progettazione di reti di poligenerazione, che potrebbero essere sfruttati da operatori del settore (ESCO, municipalizzate, ecc.) per rispondere ai requisiti imposti dalla normativa, oltretutto incrementare la redditività economica e i risparmi energetici nella gestione di questi servizi.

a.1 Sviluppo di strumenti per l'ottimizzazione dei consumi energetici del sistema edifici-impianti nella configurazione di distretto energetico, attraverso la modellazione dinamica dei carichi termici ed elettrici

Il presente obiettivo è finalizzato, nell'orizzonte temporale dei tre anni di realizzazione del progetto, allo sviluppo di un ambiente di progettazione e simulazione di un distretto energetico. Nell'ambito dello studio di scenari innovativi sono state individuate e implementate in ambiente Matlab/Simulink architetture e configurazioni di reti elettriche e termiche evolute predisposte alla gestione centralizzata di un sistema multi edificio caratterizzato da utenze con richieste termiche disomogenee (abitazioni, uffici, negozi, centri commerciali).

In particolare, proseguendo l'attività iniziata nella precedente annualità, sono state ampliate le funzionalità e le potenzialità della piattaforma di simulazione di reti energetiche locali sviluppata in collaborazione con il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università di Palermo

²⁰ Art. 14, Direttiva sull'efficienza energetica 2012/27/UE, del 25 ottobre 2012, che dovrà essere recepita dagli Stati Membri entro il 5 giugno 2014.

(Rapporto RdS/2012/080) e con il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università di Roma Sapienza (rapporto RdS/2012/070).

Nella prima fase dell'attività di ricerca, in collaborazione con il Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo, sono state definite le topologie dei layer elettrico e termico della piattaforma di simulazione al fine di progettare le relative interfacce utente, implementare nell'ambiente di sviluppo Simulink la struttura della piattaforma di simulazione integrata e modellare i componenti aggiuntivi necessari per estendere il modello di rete implementata nella precedente annualità.

Il contributo fornito dal Dipartimento DEIM sullo sviluppo della piattaforma di simulazione ha riguardato l'implementazione di alcuni componenti aggiuntivi da integrare al modello di rete elettrica realizzato nella scorsa annualità. In particolare, le attività si sono articolate come segue:

- implementazione degli algoritmi di Energy Management System per le micro grid in modo da ottimizzare i flussi di potenza nelle linee tra sorgente programmabile e utenze differibili presenti all'interno del distretto;
- implementazione degli algoritmi di controllo e gestione degli accumuli elettrici (modellizzati nell'attività svolta da ENEA) presenti all'interno della microgrid cercando di inseguire obiettivi di tipo tecnico/economico;
- implementazione della finestra generale del sistema di interfaccia per definire la topologia del layer termico ed elettrico;
- implementazione delle interfacce utente specifiche dei componenti che costituiscono il layer elettrico (trasformatori, linee, utenze);
- simulazione di microgrid elettriche realistiche in presenza di sistemi di Energy Management System e sistemi di storage.

Al fine di omogeneizzare i linguaggi di programmazione sia per la parte interfaccia utente sia per l'ambiente di sviluppo in Simulink si è resa necessaria una continua attività di collaborazione con ENEA.

Le attività ENEA hanno riguardato la modellazione del layer termico, implementazione dell'interfaccia corrispondente, implementazione di sorgenti non programmabili, sviluppo e caratterizzazione del modello di accumulo per le reti di poligenerazione, sviluppo di un prototipo di misuratore con metriche avanzate e campagne di test sperimentali su impianto STAT-COM della Casaccia.

E' stato sviluppata una nuova struttura software in Simulink al fine di estendere le funzionalità della piattaforma integrata ad un sistema di poligenerazione per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e simulare un numero maggiore di utenze e di nodi rispetto alla precedente versione.

In particolare per rispondere sia alle limitazioni del modello Simulink multi-edificio sia alle esigenze di modellare in modo quanto più corretto le micro reti termiche reali, è stata fissata una topologia di rete del tipo radiale con 10 utenze derivate dalla dorsale principale, un generatore termico in partenza della rete (CHP, caldaia, pompa di calore, ecc.) e un generatore di integrazione (solare termico) in derivazione alla linea principale. Nello schema funzionale Simulink (rapporto RdS/2013/118), ogni edificio (ovvero utenza) è stato modellato con proprie caratteristiche, che possono essere arbitrariamente scelte dall'utente nella fase di progettazione attraverso l'inizializzazione di specifici parametri, che permettono di riprodurre meglio i comportamenti disomogenei delle situazioni reali.

Al fine di riprodurre una gestione centralizzata dell'energia prodotta localmente nella rete di edifici sopra descritta, è stato necessario modellare un sistema in grado di concentrare la richiesta termica delle singole utenze in una "domanda aggregata"; tale sistema calcola, infatti, ogni 900 s il carico termico generato dalle singole utenze in modo da controllare la potenza generata dal sistema di poligenerazione per mantenere in equilibrio la temperatura della rete.

La struttura di rete implementata con un maggiore numero di nodi e di utenze esige una caratterizzazione più dettagliata delle singole tratte di rete, in quanto, la temperatura dei singoli nodi, e quindi anche le perdite di rete, è una funzione esponenziale strettamente dipendente oltre che della portata anche del diametro e della lunghezza di ciascuna tratta. Per consentire una parametrizzazione dei singoli componenti di rete è stato implementato tramite l'editor di Matlab un file di configurazione delle rete termica che permette di riprodurre fedelmente in Simulink la rete termica locale da simulare.

Quindi, la rete termica è stata arricchita con un mix di sorgenti energetiche basato sulla collaborazione di sistemi tradizionali programmabili (CHP, caldaia, pompa di calore) e sul supporto di sorgenti non programmabili (solare termico, fotovoltaico).

La configurazione in assetto poligenerativo delle sorgenti implementate nella piattaforma di simulazione prevedono: un sistema di trigenerazione con assorbitore integrato con impianto solare termico, un sistema di

trigenerazione integrato con chiller estivo, un sistema di trigenerazione accoppiato tramite "asse elettrico" ad un sistema pompa di calore-accumulo elettrico.

Il risultato delle attività di ricerca consiste nell'integrazione del mix energetico proposto con il modello di rete termica e la messa appunto delle logiche di controllo implementate al fine di sfruttare ottimamente il contributo fornito dalle sorgenti non programmabili (solare termico) alla rete e allo stesso tempo non ridurre eccessivamente le ore di funzionamento del cogeneratore.

Il sistema di controllo implementato per il layout con solare termico privilegia il funzionamento della sorgente non programmabile verificando per mezzo di un termostato se la potenza prodotta dal campo solare è in eccesso rispetto alla richiesta aggregata delle utenze, dissipando l'eventuale energia in eccesso prodotta dai collettori se la temperatura della rete supera la temperatura di set point predefinita. Se il campo solare non riesce a compensare la richiesta delle utenze, un secondo termostato attiva l'impianto di trigenerazione in relazione alle esigenze termiche della rete.

Su ciascuno delle architetture impiantistiche elencate è stata effettuata una campagna di simulazioni per verificarne la corretta integrazione e il funzionamento del sistema di controllo. Come esempio in Figura 361 si mostrano i risultati della simulazione nel caso di una rete locale a servizio di 10 utenze disomogenee (un edificio commerciale, un edificio uffici e complesso residenziale costituito da 8 villette a schiera) alimentata da un trigeneratore (100 kW_e e 80 kW_t) integrato con un campo solare costituito da 132 m² di collettori termici e un assorbitore da 70 kW_t (Figura 362).

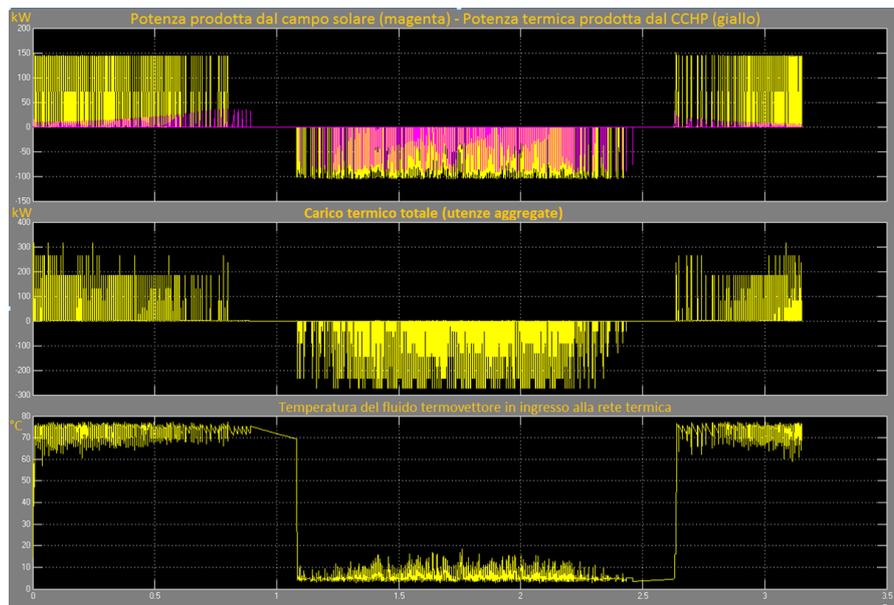


Figura 361. Simulazione annuale dell'architettura di rete termica con 10 edifici servita dal sistema poligenerativo CHP con solare termico

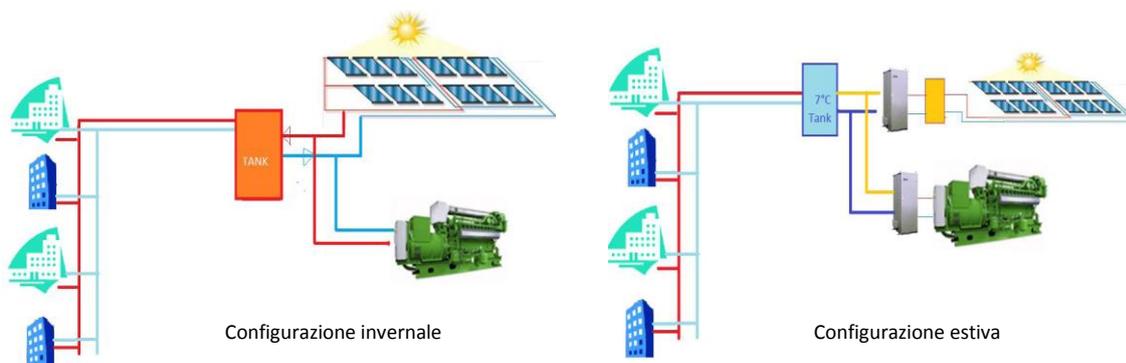


Figura 362. Architettura del sistema di poligenerazione: impianto di trigenerazione con integrazione del solare termico

I grafici evidenziano come le due sorgenti concorrono al bilanciamento della rete termica durante l'intero anno garantendo il confort delle utenze connesse alla rete.

Nella seconda fase dell'attività, è stata implementato all'interno dell'ambiente Simulink una architettura di rete basata su un sistema ibrido caratterizzato da un accumulo elettrico e pompa di calore accoppiata, tramite "albero elettrico", all'impianto di trigenerazione presente nelle rete termica (Figura 363).

La scelta impiantistica dell'accumulo risulta fondamentale per disaccoppiare nel tempo l'energia elettrica prodotta dall'impianto di trigenerazione con il funzionamento della pompa di calore ottimizzando lo scambio di potenza elettrica con la rete o consentendone l'autoconsumo.

Il modello dell'accumulo, integrato all'interno della microgrid termo-elettrica, oltre ad ottimizzare lo sfruttamento delle risorse energetiche, con funzioni quali il load-leveling o il peak-shaving del carico elettrico, consente una migliore gestione anche della rete termica in presenza di utenze disomogenee sia per profili giornalieri di utilizzo sia per consumi, consentendo in certi casi anche il differimento degli investimenti per il potenziamento della rete termica fornendo localmente all'utenza le quota di potenza che la rete non potrebbe fornire.

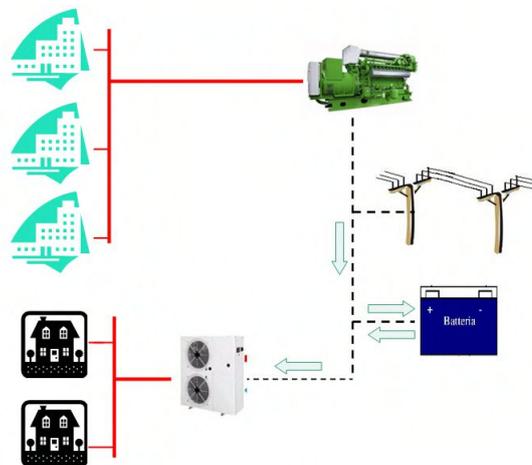


Figura 363. Layout ibrido: rete termica con integrazione del sistema accumulo - pompa di calore elettrica

Gli algoritmi per ottimizzare i flussi energetici scambiati con l'accumulo e il dimensionamento ottimale dello stesso nelle microgrid sono stati sviluppati e implementati dall'Università di Palermo e descritti nel rapporto RdS/2013/104.

Il modello dell'accumulo elettrico è stato caratterizzato tramite misure effettuate su un sistema reale presente all'interno del centro Ricerche ENEA Casaccia.

Con il layout proposto in Figura 363 risulta possibile climatizzare un'utenza termica disomogenea rispetto alla restante parte della rete o non raggiunta dalla rete (ad es. costruita in epoca diversa).

Per l'implementazione del modello sono state considerate alcune condizioni tecniche per non compromettere l'uso ottimale delle batterie:

- lo stato di carica delle batterie deve essere mantenuto entro una certa fascia di sicurezza;
- la potenza che fluisce attraverso il convertitore deve variare fra un minimo ed un massimo;
- il ciclo di ricarica nelle ventiquattro ore sia preferibilmente unico, per limitare l'invecchiamento delle batterie.

Come indicato nello schema in Figura 364, il modello energetico dell'accumulo elettrico prevede un primo blocco, implementato in una embedded function di Simulink, con il quale vengono determinati (in modo non ottimizzato) i flussi energetici da/verso rete e da/verso accumulo, in funzione dello stato di carica della batteria e della potenza disponibile generata dal sistema di poligenerazione.

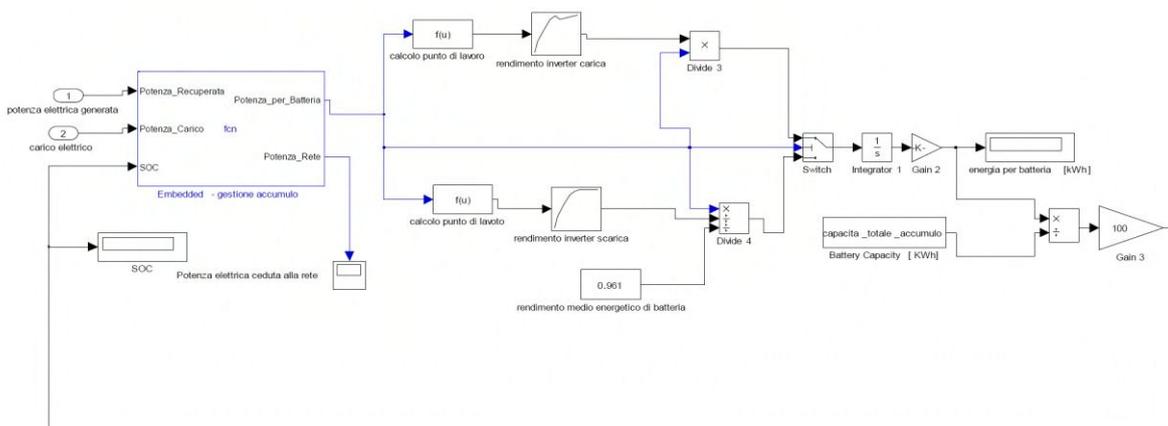


Figura 364. Modello in simulink del accumulo elettrico implementato nella piattaforma di simulazione

Se lo stato di carica (SOC) della batteria si trova nel range di sicurezza e se la potenza disponibile è inferiore a quella nominale dell'inverter allora le batterie vengono caricate. Se la potenza generata dal sistema di generazione locale è inferiore al carico (es. pompa di calore ad azionamento elettrico) allora lo storage viene scaricato per coprire il sovraccarico fino al valore di SOC minimo impostato.

Il SOC dell'accumulo è calcolato integrando la potenza elettrica disponibile. Quando la potenza elettrica disponibile è positiva l'uscita dell'integrale incrementa il SOC fino al valore SOC_{max} impostato, se la potenza elettrica generata è inferiore al carico l'uscita dell'integrale decrementa il SOC dell'accumulo fino al SOC_{min} impostato.

L'effettiva potenza elettrica accumulata o ceduta alla rete dal sistema di accumulo è calcolata considerando le curve di rendimento energetico del convertitore elettronico di potenza (Figura 365) e il rendimento energetico del pacco batterie.

Il rendimento energetico del convertitore di potenza è stato determinato tramite una campagna di prove effettuata utilizzando la piattaforma di monitoraggio per sistemi poligenerativi implementata dal Dipartimento DIAEE dell'Università Sapienza di Roma (rapporto RdS/2013/103). Il rendimento energetico del pacco batterie è stato determinato come media dei valori ottenuti dai test descritti nel rapporto ERSE (ora RSE) di febbraio 2010²¹

In Figura 366 e 367 sono riportati, come esempio, i risultati di una simulazione relativa alla configurazione con 3 edifici aventi carichi termici disomogenei, CHP e pompa di calore elettrica. In particolare l'edificio 1 e l'edificio 2 sono rispettivamente un edificio commerciale da 1000 m² e un edificio uffici da 600 m². L'edificio 3, alimentato dal sistema accumulo-pompa di calore, è un condominio di otto utenze monofamiliari costruito in epoca diversa dell'anno di installazione della rete termica e a distanza tale da non giustificarne i costi di potenziamento e ampliamento della stessa. La soluzione ibrida proposta prevede quindi l'accumulo elettrico al fine di consentire uno shifting del carico elettrico generato dalla pompa di calore nelle ore di produzione del CHP annullando la richiesta di potenza elettrica dalla rete. Si riportano di seguito i risultati di simulazione corrispondenti ad una settimana di funzionamento della rete termica (dal 1 al 7 Gennaio).

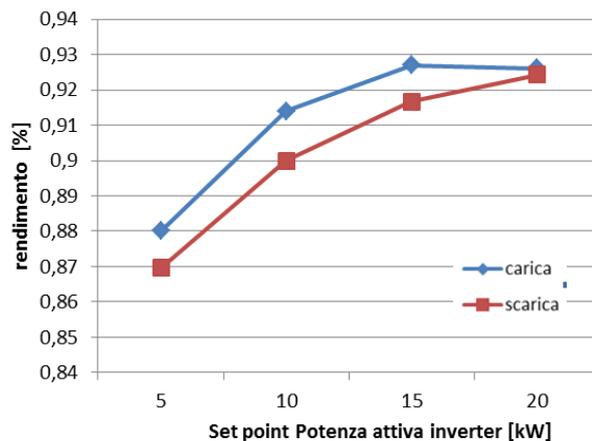


Figura 365. Curva di rendimento del convertitore AC/DC - DC/DC implementata nel modello Simulink, valutato con misure effettuate su un sistema reale da 30 kVA presente nel C.R. ENEA Casaccia

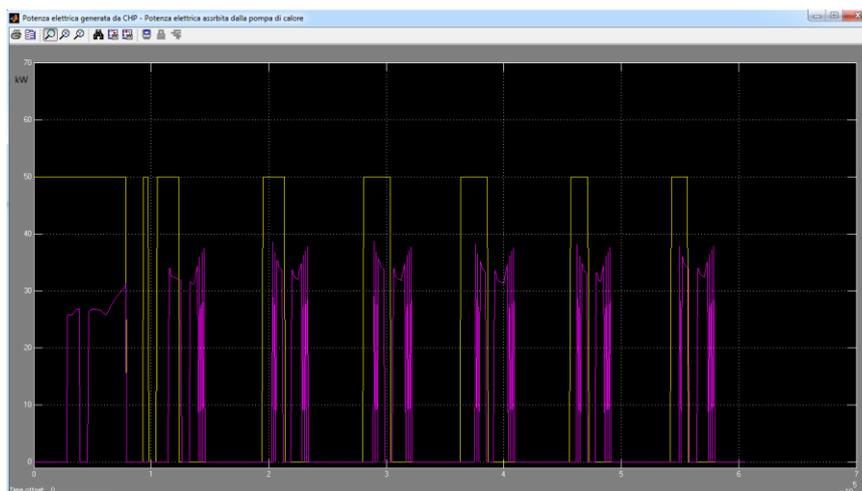


Figura 366. Potenza elettrica generata dal CHP [kW] (giallo) - Potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore [kW] (magenta)

²¹ Definizione e validazione di una procedura di prova per batterie al litio per applicazioni stazionarie. Installazione e sperimentazione nella test facility di GD di un filtro attivo con supercapacitori - Rapporto ERSE febbraio 2010

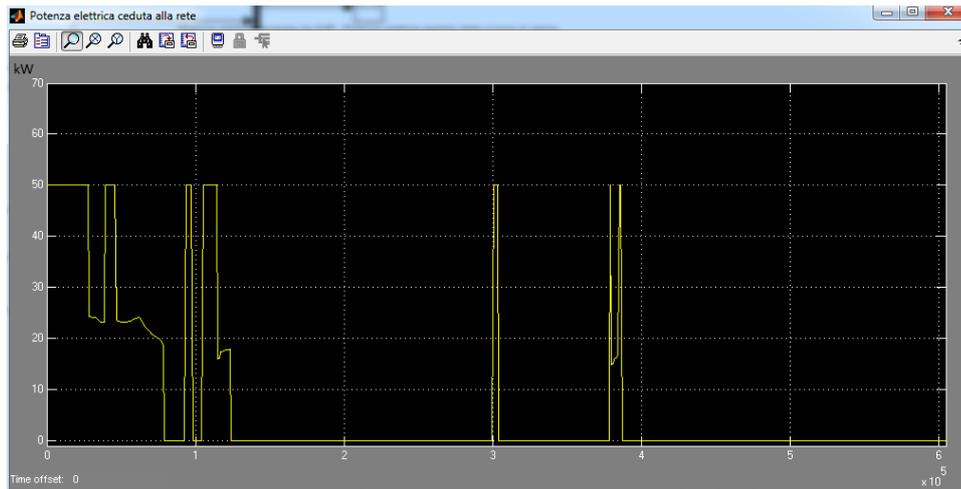


Figura 367. Flussi di potenza da/verso la rete elettrica [kW] - Positiva ceduta alla rete , negativa prelevata dalla rete

Dal grafico risulta evidente che il profilo di produzione del cogeneratore non coincide con gli intervalli di funzionamento della pompa di calore, sia per le caratteristiche disomogenee delle utenze, che presentano orari di utilizzo diversi, sia a causa dell'inerzia termica della rete che ritarda l'accensione del cogeneratore rispetto alla richiesta dei due edifici.

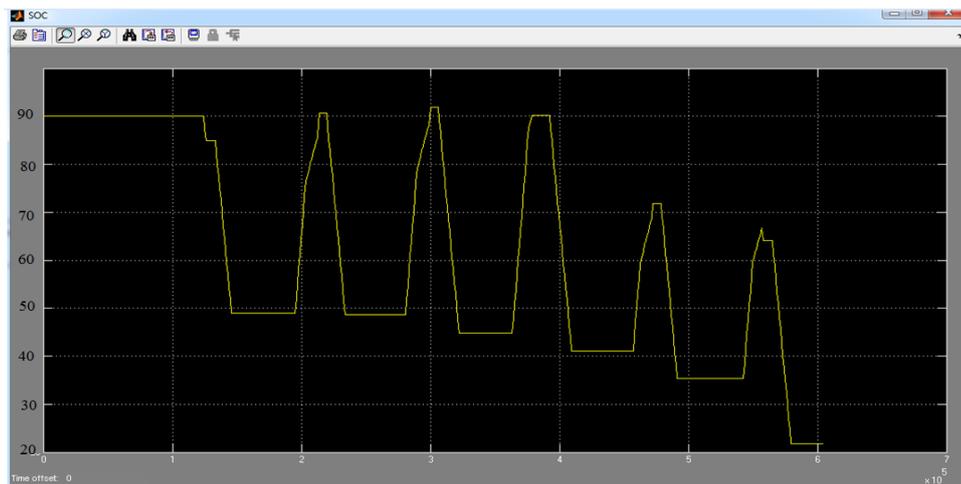


Figura 368. Andamento del SOC di batteria

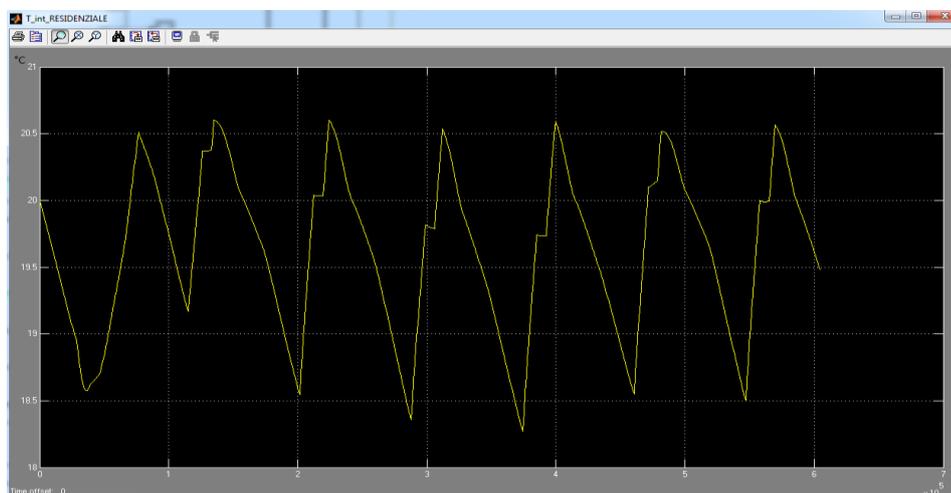


Figura 369. Temperatura oraria dell'edificio 3

L'accumulo è dimensionato in modo da compiere un solo ciclo di scarica nelle 24 ore di funzionamento, mantenendosi all'interno del range di rispetto del SOC massimo e SOC minimo imposto. In questo modo l'energia

accumulata durante le ore di funzionamento del CHP viene fornita alla pompa di calore annullando il prelievo dalla rete (in Figura 367 la potenza scambiata con la rete elettrica è sempre positiva) e mantenendo l'edificio 3 in comfort termico durante l'intera settimana (la temperatura scende ad un valore minimo di 18,5 °C durante le ore serali con pompa di calore spenta).

La domenica il CHP rimane spento, poiché gli edifici alimentati dalla rete sono chiusi (uffici e centro commerciale); l'accumulo riesce comunque ad alimentare autonomamente la pompa di calore, senza ricorrere alla rete, grazie all'energia accumulata durante il funzionamento del cogeneratore nei giorni precedenti. Alla fine della settimana simulata l'accumulo presenta uno stato di carica residuo pari al 20% coincidente con il minimo impostato.

Interfaccia grafica del simulatore di reti termiche distribuite

Al fine di rendere agevole l'inserimento dei parametri di configurazione di ogni singolo componente, che costituisce il layer termico della piattaforma integrata, si è reso necessario implementare delle interfacce associate ad ogni tipologia di componente della rete simulata.

Le "finestre di dialogo" sono state implementate in linguaggio Java, un linguaggio caratterizzato dalla facilità di interoperabilità tra piattaforme e linguaggi diversi, e che si presta quindi allo scopo di integrare tra loro componenti software sviluppati in ambienti diversi; in questo modo è stata sviluppata l'integrazione anche con l'interfaccia-utente generale dello strumento di configurazione della rete termoelettrica, sviluppato in questa annualità dall'Università di Palermo.

Ad ogni oggetto che è possibile inserire nella piattaforma di simulazione descritta in precedenza, infatti, è associato un modello e per ciascuna tipologia di tali componenti è stata sviluppata una "finestra di configurazione" specifica. In questo modo l'utente che deve inserire i dati viene agevolato nella scelta della tipologia dei parametri da configurare attraverso una descrizione sintetica e dei relativi valori, attraverso l'impostazione di un controllo automatico dei range di funzionamento.

Quando la configurazione è effettuata e confermata dall'utente, i dati vengono comunicati al modello, tramite un protocollo di scambio dati concordato in precedenza: un file di testo (leggibile in chiaro anche senza l'ausilio di software particolari), che contiene etichette e valori dei vari parametri necessari, che costituiscono l'input dei modelli e attraverso i quali l'utente può revisionare le configurazioni già inserite (modificare, cancellare, salvare o ricaricare da file di default predefiniti).

Particolare cura è stata prestata nell'implementazione della finestra di dialogo, che caratterizza l'edificio in tutti i suoi parametri termofisici: è stata, infatti, utilizzata e adattata allo scopo parte della configurazione utilizzata dal modello mono edificio del software ODESSE, implementato nelle precedenti annualità. Questa interfaccia si occupa, oltre a permettere l'inserimento dei dati dell'utente, di calcolare in base a vari database preesistenti e a calcoli, che vengono realizzati di volta in volta, tutti i parametri statici e dinamici relativi sia alla struttura, sia al tipo di uso di tale edificio.

Per il dimensionamento e la caratterizzazione di ogni componente della rete termica è stata sviluppata una maschera di inserimento dove è possibile definire la configurazione di ogni parametro, partendo dalla descrizione implementativa dei singoli modelli di simulazione.

Infine, per l'architettura della rete principale, tramite un sistema di "finestre tabulate" messe in sequenza, è possibile dimensionare la rete stessa e tutte le tratte che da tale rete portano ai singoli componenti, definendo un set di parametri indipendenti per ogni derivazione. Attualmente, in accordo con il modello Simulink, sono previste fino a 10 tratte attivabili dall'utente, ma il software sviluppato consente di incrementare il numero di derivazioni senza alcun costo computazionale aggiuntivo.

La Figura 370 mostra la schermata di una delle interfacce implementate, in particolare la finestra di dialogo che si occupa di definire i parametri della rete termica.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/118 redatto da ENEA.



Figura 370. Interfaccia utente: caratterizzazione della rete termica e delle derivazioni

Sistema distribuito di monitoraggio avanzato dei consumi energetici per la gestione di reti energetiche con elevata presenza di FER

I temi sviluppati nell'ambito della seguente attività ENEA riguardano l'analisi delle modalità di comunicazione tra dispositivi di misura presenti in un distretto energetico. L'attività ha riguardato lo studio di un protocollo che possa essere scelto come linguaggio di comunicazione univoco nello scambio di informazioni tra meter che effettuano la raccolta delle misure di energia e concentratori, che sono dispositivi che interfacciano i meter con il resto della rete elettrica e con uno o più management center. È stata in seguito realizzata una stazione di testing di un protocollo in particolare il DLMS/COSEM che rende possibile la comunicazione tra un client ed un server e il recupero di informazioni riguardanti i consumi elettrici da parte del client. Inoltre, in collaborazione con la Seconda Università degli Studi di Napoli, è stata realizzata l'interfaccia di comunicazione dei meter utilizzando il CAN bus.

Nella prima parte dell'attività è stato implementato, in collaborazione con la Seconda Università di Napoli, un prototipo di meter. Il prototipo oltre ad avere capacità di calcolo adeguate alle grandezze che deve misurare, è particolarmente attrezzato per poter comunicare e scambiare dati. Proprio perché la comunicazione è un tema centrale assieme al meter è stato realizzato anche il prototipo di un concentratore così da poter implementare un primo modello di rete solo due attori che scambiano informazioni. In particolare al fine di testare il sistema operativo e la tempistica e correttezza di esecuzione dei task principali, si è implementato un meccanismo di comunicazione semplice basato su CAN bus che, per mezzo di un protocollo proprietario, desse la possibilità ad un meter (slave) di poter comunicare con un master server.

La comunicazione su CAN bus risulta efficace e puntuale proprio perché questo tipo di protocollo è stato creato per lavorare in ambienti rumorosi di tipo industriale, sono previsti meccanismi di ritrasmissione e controllo degli errori proprio per rendere affidabile la comunicazione. L'implementazione di un protocollo proprietario per lo scambio dei dati impone un forte limite sulla interoperabilità di meter qualora costruiti da produttori differenti. Vista quindi la necessità di trovare un comune linguaggio per far comunicare i diversi dispositivi sulla rete è cominciato uno studio per individuare tra i vari protocolli esistenti quello più adatto per lo scambio di informazioni su una smart grid.

Tra i diversi protocolli di comunicazione si è analizzato il protocollo con il DLMS/COSEM. La scelta di questo protocollo non è casuale, sono molte le organizzazioni internazionali che stanno promuovendo questo protocollo come punto di riferimento per la comunicazione di dispositivi costituenti le smart grid. Tra i pregi di questo protocollo rispetto ai concorrenti sopra citati c'è il fatto che ha la capacità di supportare diversi link fisici.

Per concludere possiamo dire che effettivamente il protocollo DLMS/COSEM sembra essere una buona scelta come protocollo di comunicazione in una smart grid. Esso permette la bidirezionalità del flusso informativo, il meter è quindi capace di inviare misure ma anche ricevere informazioni e comandi. Inoltre ciò che rende questo protocollo particolarmente adatto alle applicazioni per smart grid è la capacità di supportare molti link fisici sia wired che wireless.

Maggiori dettagli sull'attività sono contenuti nel rapporto RdS/2013/136.

a.2 Studi e caratterizzazione di reti termiche distribuite, valutazione dei risparmi energetici conseguibili grazie all'integrazione di impianti basati su tecnologie non diffuse con ampi potenziali di efficientamento

Sono state analizzate le principali problematiche relative all'efficientamento delle reti di teleriscaldamento già esistenti allo scopo di individuare metodologie di gestione (produzione e prelievo) che permettono di aumentare la capacità di servizio delle attuali infrastrutture, tale attività è stata condivisa con il Dipartimento Energia (DENEG) del Politecnico di Torino che ha approfondito le problematiche e ha individuato una serie di indicatori di performance. Un particolare approfondimento è stato dedicato ad una nuova prospettiva, che si affianca al teleriscaldamento, quella del teleraffrescamento: l'uso del calore prodotto da impianti di diversa tipologia per la produzione di acqua refrigerata, mediante gruppi frigoriferi ad assorbimento.

Le attività ENEA hanno riguardato: analisi di architetture di reti di teleraffrescamento, implementazione del modello di rete di teleraffrescamento nella piattaforma integrata, integrazione impianto termico (CHP) e solar-cooling in ambiente Simulink, campagne di simulazione per la validazione della piattaforma, diffusione obiettivi progettuali e risultati.

Nell'ambito della distribuzione di energia frigorifera attraverso le reti di teleraffrescamento, la valutazione degli scenari energetici è stata effettuata basandosi sulle possibili configurazioni impiantistiche presenti sul territorio italiano, differenziandola sia in termini di richiesta energetica e sia in termini di zona climatica, come indicato nella Direttiva Europea 2012/27 UE.

Le modalità più diffuse di produzione di energia frigorifera per il teleraffrescamento sono la generazione diretta in centrale, mediante macchine frigorifere a compressione (GFC) o macchine frigorifere ad assorbimento (GFA) e la produzione presso le utenze attraverso l'utilizzo di GFA.

L'attuale distribuzione nazionale delle reti di tele-raffrescamento registra un incremento di potenza installata, rispetto all'inizio dello scorso triennio, che fa apparire il settore meno statico e più incisivo in termini percentuali sulla produttività totale di energia termica. In particolare, si registra un maggiore contributo (6,9%) sulla potenza totale installata degli impianti centralizzati che alimentano le reti di tele-raffrescamento (tipo GFC) rispetto agli impianti (tipo GFA) localizzati presso l'utenza (2,8%).

Tuttavia, l'aumento di crescita non è ancora significativo e incoraggiante se paragonato all'energia termica totale erogata all'utenza. Di fatto, in base ai dati disponibili, la produzione di energia frigorifera ha subito nel triennio 2009-2011 una riduzione del 26% come si evince dalla Tabella 78. Tale divergenza, rispetto al trend di crescita della potenza installata, potrebbe derivare sia da dati in aggiornamento per le reti attualmente censite e sia dal mancato funzionamento di alcune di esse.

Tabella 78. Produzione di energia frigorifera (Fonte AIRU)

ANNO	2011	2010	2009
Produzione totale, MWhf	95.464	98.287	129.385

Per quanto riguarda le modalità di produzione e distribuzione dell'energia frigorifera si constata un trend positivo a favore delle reti di tele-raffrescamento. La Figura 371 mostra l'andamento della produzione di energia frigorifera, mentre in Figura 372 si riportano le variazioni annuali e triennali di energia frigorifera prodotta per mezzo delle due tipologie impiantistiche.

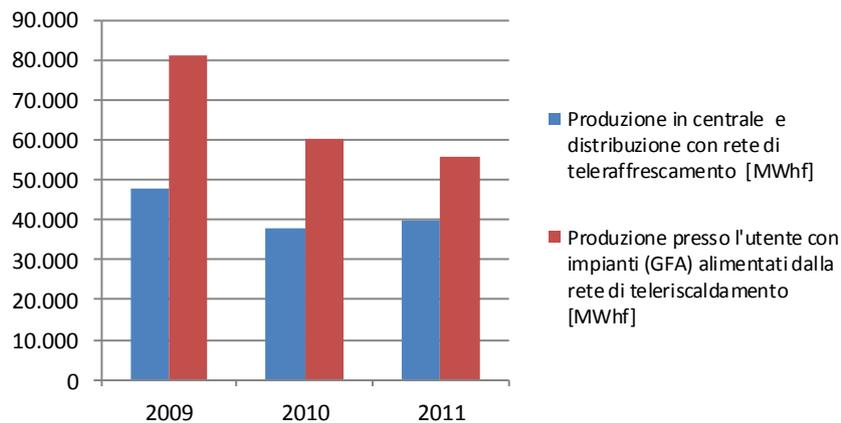


Figura 371. Energia frigorifera prodotta nel triennio 2009-2011

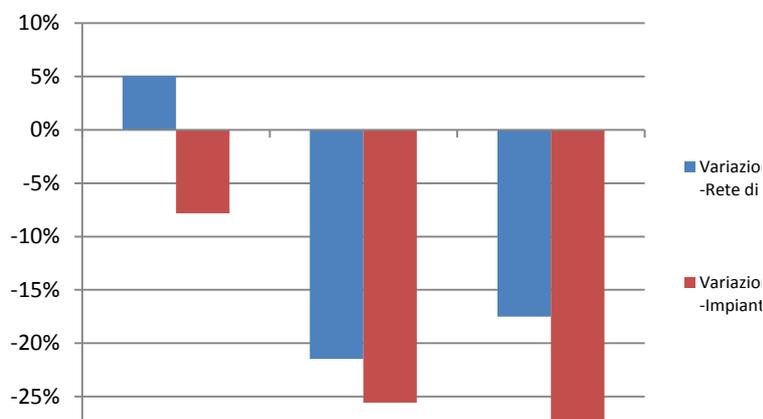


Figura 372. Variazione di energia frigorifera prodotta

Modello rete di teleraffrescamento

Dall'analisi delle tipologie di rete utilizzate per teleriscaldamento e teleraffrescamento e sulla base del lavoro svolto nella annualità precedente, si è scelto di implementare (in ambiente Matlab-Simulink) le due configurazioni più diffuse:

- Rete singola con generazione fluido termovettore centralizzata: presenta un unico sistema di distribuzione in cui alternativamente viene inviato fluido termovettore "caldo" o "freddo"; la centrale termica è composta da un generatore termico abbinato a una macchina frigorifera ad assorbimento (MFA) che nel periodo estivo fornisce l'energia frigorifera sfruttando il calore recuperato dal motore primo (*scenario con generazione centralizzata*).
- Rete singola con generazione fluido termovettore caldo centralizzata e generazione fluido termovettore fredda distribuita: anche questa tipologia presenta un unico sistema di distribuzione del fluido termovettore ad alta temperatura; la centrale termica è quindi composta da un generatore termico che si interfaccia nel periodo estivo con delle macchine frigorifere ad assorbimento installate presso le utenze (*scenario con generazione distribuita*).

La scelta dei sistemi di generazione termica è caduta sulle macchine maggiormente usate negli impianti reali, cioè un cogeneratore con motore a combustione interna per la generazione termica e una macchina frigorifera ad assorbimento per la produzione del freddo.

La valutazione delle prestazioni energetiche dei due scenari implementati è stata effettuata mediante una analisi comparativa confrontando ciascuna configurazione con una di riferimento in cui ciascuna utenza è asservita ad un sistema di generazione "calda" e "fredda" autonomo ("*scenario zero*"). Il confronto è stato effettuato non solo valutando i consumi di energia ma anche implementando appositi indici che consentono di valutare le prestazioni energetiche dei singoli scenari.

Con l'introduzione del teleraffrescamento e con l'aumento delle potenze richieste dagli edifici la rete sviluppata nell'annualità precedente ha evidenziato fluttuazioni di temperatura molto pronunciate per cui si è deciso di aggiungere un accumulo fisico, il più piccolo in grado di garantire un funzionamento corretto della stessa. Va precisato che anche nella realtà le reti energetiche sono normalmente dotate di accumuli aventi la funzione di volani termici.

Come già descritto nel paragrafo precedente, la rete simulata ha una configurazione radiale ed è asservita a tre utenze, un edificio ad uso terziario commerciale, uno terziario uffici e uno residenziale. Per poter valutare l'incidenza geografica su ciascuno scenario, le simulazioni sono state condotte per tre città rappresentative di altrettante fasce climatiche: Milano, Roma e Palermo.

I grafici di Figura 373 (relativi alla città di Roma) sintetizzano i risultati ottenuti e dimostrano come i modelli implementati siano in grado di simulare il comportamento di una rete reale; in particolare è mostrato l'andamento della temperatura della rete che si mantiene intorno ai 75 °C in inverno e ai 5 °C in estate, valori che assicurano la possibilità di mantenere il comfort interno a ciascun edificio.

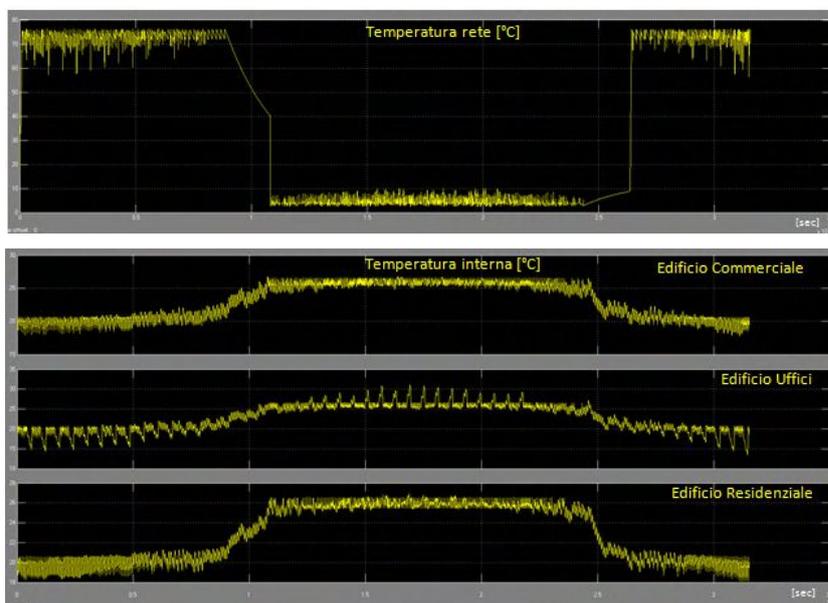


Figura 373. Andamento della temperatura della rete e dei tre edifici

Gli indici usati per confrontare le due configurazioni di rete, scelti fra quelli più comunemente usati in letteratura, sono:

- Rendimento di primo principio (RPP)
- Fuel Energy Saving Ratio (FESR)
- Trigeneration Primary Energy Ratio (TPES).

Questi dimostrano come lo scenario più prestazionale sia quello con generazione centralizzata; a titolo di esempio viene riportato il confronto fra i vari indici per il caso di Roma.

Tabella 79. Indici di prestazione energetica - Roma

	Indici di prestazione energetica (Roma)		
	RPP	FESR	TPES
CENTR.	86,08%	4,24%	10,34%
GD	82,66%	3,22%	5,55%

Modello di impianto termico (CHP) con solar cooling

Un'altra attività ha riguardato lo sviluppo di un modello di impianto per la generazione termica a fonte rinnovabile basato sulla tecnologia del solar cooling integrato con un impianto di cogenerazione con motore a combustione interna per la produzione di energia termica.

Il modello di impianto di solar cooling sviluppato ha una configurazione con doppio accumulo caldo e si va ad aggiungere al modello con un solo accumulo per poter disporre di tutte le varie configurazioni di questa tipologia di impianti e poterne così simulare le peculiarità prestazionali. Tale scelta ha comportato la riprogettazione dell'intero modello ma è giustificata dal fatto di poter disporre nel C.R. ENEA Casaccia di un impianto a doppio accumulo che ha permesso la validazione del modello sviluppato con i dati della campagna sperimentale condotta. In particolare si tratta dell'impianto all'edificio del C.R. Casaccia denominato F51.

L'integrazione del solar cooling con il cogeneratore è stata effettuata assegnando la priorità all'impianto a fonte rinnovabile e considerando secondo la seguente logica:

- in inverno il cogeneratore si attiverà solo se la potenza dall'edificio eccede quella prodotta dal campo solare, integrando la produzione del campo solare;
- in estate si effettua lo stesso tipo di controllo confrontando la produzione della macchina ad assorbimento alimentata dal campo solare con la richiesta di potenza frigorifera, sempre secondo la logica di utilizzare la produzione del cogeneratore come integrazione della potenza prodotta dalla fonte rinnovabile.

In pratica il modello è composto da un assorbitore centrale che viene alimentato dal campo solare ed integrato dal cogeneratore, realizzando una trigenerazione mista cogeneratore-fonte rinnovabile. Il modello è quindi dotato dei sistemi di backup classici di un impianto di solar cooling (caldaia e pompa di calore a compressione), integrato con il microgeneratore, selezionabili con tutte le possibili combinazioni.

Il sistema di controllo è il componente dell'impianto che ha richiesto il maggiore sforzo implementativo ed è stato sviluppato cercando di replicare nel modo più fedele possibile la logica con cui è stato realizzato l'impianto dell'F51. Per questo motivo è composto non da un unico supervisore ma da più blocchi preposti al controllo dei moduli di cui è costituito l'impianto. Ad uno dei due accumuli è imposta priorità rispetto allo scambio termico con il campo solare, a parità di condizione viene quindi riscaldato per primo; l'altro accumulo ha, invece, priorità nell'interfacciarsi con l'utenza e quindi avrà precedenza nella fase di prelievo. In pratica mentre un accumulo aumenta il suo livello termico grazie all'apporto del campo solare fino alla temperatura di riferimento, l'altro alimenta l'utenza "scaricandosi"; quando quest'ultimo ha esaurito la sua capacità di trasferire calore, cioè è sceso sotto un valore minimo di temperatura opportunamente scelto in funzione delle caratteristiche dell'utenza, il sistema inverte gli accumuli: quello appena "caricatosi" alimenta l'utenza, mentre l'altro inizierà a "caricarsi". Prelievo ed accumulo non vengono mai effettuati dallo stesso serbatoio contemporaneamente. Un diagramma di flusso della logica implementata è riportato nel rapporto tecnico RdS/2013/117. Lo schema del controllo in regime estivo implementato è riportato nella Figura 275, dove sono visibili i tre sistemi di integrazione (CHP, EHP e caldaia), l'assorbitore ed il supervisore denominato "controllo estate".

La validazione ha riguardato più dettagliatamente la parte di modello preposta a trasferire l'energia accumulata dai pannelli solari ai serbatoi di accumulo, essendo questa fondamentale per il funzionamento del modello sviluppato e di carattere più generale, in quanto non influenzata dai profili d'uso dell'edificio.

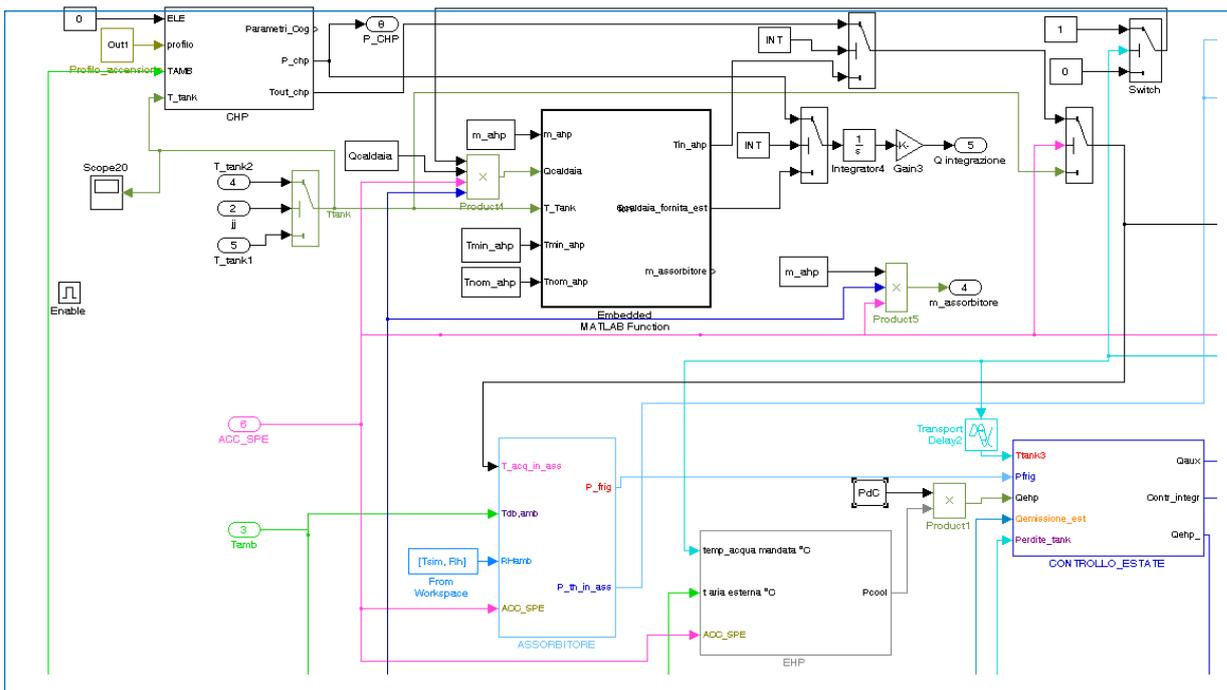


Figura 374. Schema globale controllo dei sistemi di integrazione in regime estivo

Il grafico di Figura 275 riporta il confronto fra la temperatura in uscita dallo scambiatore solare lato accumuli misurata e quella simulata.

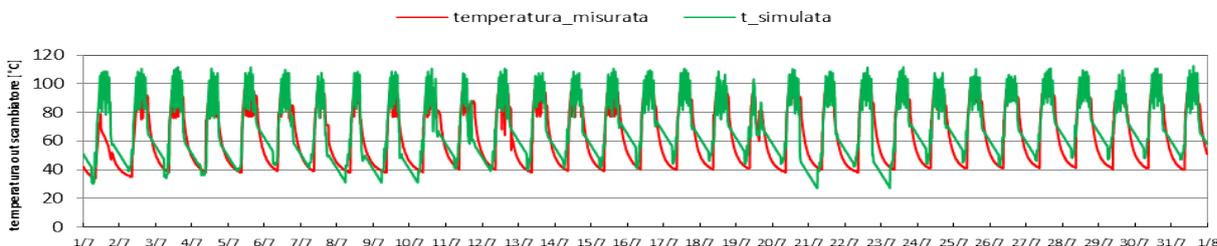


Figura 375. Temperatura uscita scambiatore solare lato accumuli

Tabella 80. Flussi energetici

Flussi energetici (kWh/a)	CHP	CALD
<i>stagione invernale</i>		
fabbisogno riscaldamento	32400	32440
energia erogata dal CHP	22300	22350
energia prodotta dal campo solare	13800	13800
energia totale prodotta	36100	36150
frazione solare	38%	38%
<i>stagione estiva</i>		
fabbisogno raffrescamento	15290	15070
energia erogata dal CHP	12650	14520
energia prodotta dal campo solare	11150	11850
energia prodotta dall'assorbitore	15030	14830
energia totale prodotta	23800	26370
frazione solare	47%	45%

Infine la Tabella 80 presenta il confronto dei consumi annuali fra l'integrazione con caldaia e con microgeneratore.

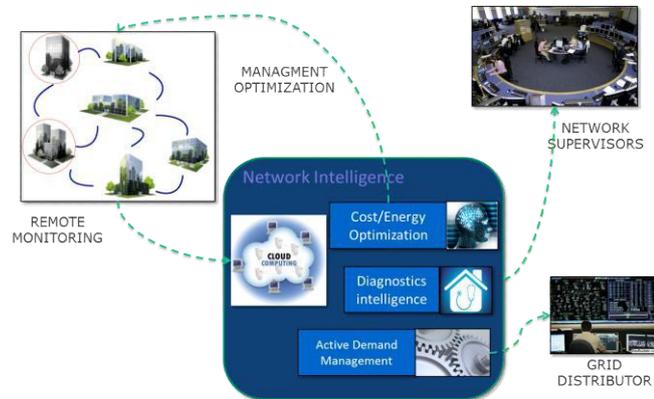
Si nota come i due sistemi di integrazione abbiano un comportamento praticamente identico in inverno, come si può desumere dalla tipologia di funzionamento del modello, mentre in estate il cogeneratore permette di sfruttare leggermente meglio il campo solare, infatti l'energia richiesta a quest'ultimo è minore rispetto al caso con la caldaia.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nei rapporti Rds/2013/116 e 117.

b. Gestione ottimale reti di edifici

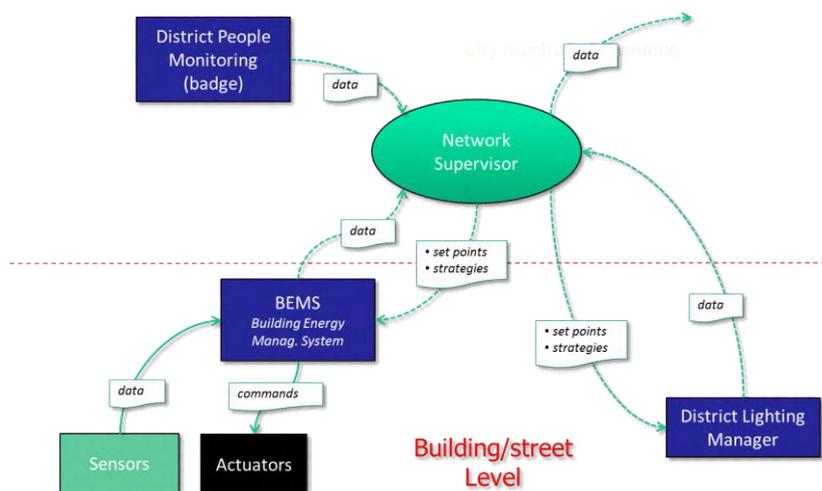
L'obiettivo di questa linea di attività è quello di sviluppare una metodologia che permetta di supportare un gestore di una rete di edifici terziari (es. uffici, scuole, agenzie postali o bancarie, etc..) e/o il gestore di uno "smart village" al fine di abbattere tutte le fonti di consumo energetico all'interno del village ed interagire con i fornitori energetici (elettrici o termici) per attuare politiche di controllo della domanda basate su una modellistica avanzata che non penalizzi il comfort dell'utente evitando quanto più possibile distacchi dalla rete.

L'approccio "building network management" può essere applicato su vasti stock di edifici (es. quartieri, città, territorio) anche non connessi tra loro ed in questo caso l'attenzione è focalizzata alla riduzione dei consumi ed alla gestione attiva della domanda. Quando si realizza la condizione di condivisione della rete termica (con presenza di generazione distribuita termica e/o elettrica) il modello si arricchisce della gestione ottimizzata dei sistemi di produzione locale della energia ed in questo caso si realizza la condizione dello "Smart District".



Lo sviluppo metodologico si basa sul concetto di "Network Intelligence System (NIS)" ,che permette l'ottimizzazione dei consumi, e su quello delle strategie di active demand control colloquiando con i sistemi di controllo ed interazione installati sugli edifici (BEMS, Building Energy Management Systems).

L'attività nel triennio 2012-2014 si articola sullo sviluppo delle metodologie di gestione, sulla simulazione della rete complessa per l'analisi e qualificazione delle scelte strategiche e valutazione delle criticità, sullo sviluppo di servizi che possono essere forniti agli utenti ed infine sullo sviluppo di una piattaforma SW di gestione in grado di comunicare con gli impianti, gli edifici, gli operatori di gestione della rete, i distributori e fornitori energetici (elettricità e gas), l'Urban Center (struttura di governo della città).



L'attività svolta nell'ambito del PAR 2012 è stata finalizzata allo sviluppo di:

- sviluppo di un simulatore dei consumi di un edificio/rete di edifici (attività svolta da Università Politecnica delle Marche);
- definizione degli algoritmi di ottimizzazione e test su simulatore (attività svolta da Università di Roma Tre);
- implementazione di un sistema di monitoraggio ed analisi consumi di una rete di edifici (attività svolta da Politecnico di Torino);
- validazione metodologie di diagnostica e controllo su un singolo edificio, ampliamento funzioni 'Smart Village Casaccia' e definizione dello scenario di riferimento teorico di 'active demand' (attività svolta da ENEA).

Il primo punto ha riguardato lo sviluppo di un simulatore semplificato dei consumi termici di una rete di edifici. Tale attività, sviluppata dall'Università Politecnica delle Marche, è stata necessaria affinché gli algoritmi di ottimizzazione sviluppati dall'Università di Roma Tre e le funzioni obiettivo sviluppate dal Politecnico di Torino potessero essere testati con uno strumento leggero, modulare e veloce che si potesse facilmente integrare in un ambiente di sviluppo standard (MATLAB). A tal fine, il codice di calcolo ODESSE sviluppato nelle precedenti annualità, non risultava idoneo a tali scopi in quanto originariamente non era stato progettato, e successivamente implementato, per essere usato da applicazioni esterne a scopo di ottimizzazione. Tale strumento è in grado di ricostruire i consumi termici (condizionamento invernale ed estivo) sulla base dei dati di input a disposizione secondo un livello di dettaglio di area (es. singolo edificio) e di rete di edifici in modo tale da poter simulare strategie di controllo su scale diverse (es. singolo edificio o cluster di edifici).

Il secondo punto, svolto dall'Università di Roma Tre, ha riguardato lo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo e la loro applicazione preliminare a degli scenari generati dal simulatore dell'Università Politecnica delle Marche con funzioni obiettivo di minimizzazione dei consumi e massimizzazione del comfort sviluppate dal Politecnico di Torino. Il simulatore, infatti, dati come input i set-point di temperatura dei termostati che afferiscono a delle zone preimpostate dell'edificio e la temperatura di mandata dell'acqua in centrale termica, fornisce i valori elettrici, termici e ambientali dell'edificio. Tali valori costituiscono l'input delle funzioni obiettivo, realizzate in collaborazione con il Politecnico di Torino, da ottimizzare. In particolare le funzioni obiettivo sono due: una fornisce un valore adimensionale relativo al comfort dell'utente, l'altra un valore relativo alla quantificazione del consumo energetico.

Tali problemi rientrano nella categoria dell'ottimizzazione multi-obiettivo, in quanto lo scopo è massimizzare il comfort dell'utente e contemporaneamente minimizzare i consumi termici. Le due funzioni sono in contrasto tra loro poiché la massimizzazione del comfort può comportare un aumento dei consumi, viceversa la minimizzazione dei consumi può comportare un decremento del comfort. In situazioni in cui le funzioni obiettivo sono totalmente o parzialmente in contrapposizione l'ottimo non è univoco, bensì un insieme di soluzioni non dominate definito come "fronte di Pareto", che sono il risultato del compromesso tra comfort e risparmio energetico.

Sono stati effettuati studi su quale approccio fosse migliore per risolvere i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo, in particolare se utilizzare i metodi di ottimizzazione basati su gradiente e sulla direzione di discesa o gli algoritmi evolutivi, basati su principi ispirati alla natura.

Questa attività si è focalizzata sullo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo (basati sulla generazione del "fronte di Pareto") in grado di trovare dinamicamente, attraverso lo sviluppo di metodologie di "fitness approximation", le migliori impostazioni tale da minimizzare i consumi energetici di un edificio e massimizzare il comfort degli utenti. Obiettivo principale di questi metodi è stato quello di trovare il punto di compromesso ottimale tra due obiettivi conflittuali (energia consumata vs. comfort) al variare delle condizioni al contorno (es. occupazione dell'edificio, condizioni meteo).

Le metodologie sviluppate nel punto precedente sono state testate su una base dati generata dal simulatore dell'edificio F40 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA. In particolare è stato analizzato il caso che richiedeva la configurazione ottimale delle impostazioni dei set point di temperatura dei termostati di 15 zone dell'edificio (5 zone per piano per 3 piani) ed il set point di temperatura di mandata della centrale termica, per un totale di 16 variabili considerando come funzioni da ottimizzare l'energia (da minimizzare) ed il comfort (da massimizzare).

Il Politecnico di Torino ha realizzato un piano di monitoraggio energetico-ambientale e un kit di misura ottimale per edifici con differente destinazione d'uso, la verifica dei sistemi di monitoraggio in campo operanti sulla rete di edifici dello "Smart Village Casaccia" e l'analisi della qualità dei dati raccolti, l'elaborazione e analisi dati energetici e microclimatici del monitoraggio in campo e lo sviluppo di modelli di diagnostica avanzata attraverso i dati del monitoraggio in campo.

E' stata condotta un'attenta analisi prendendo in considerazione un campione rappresentativo di edifici pubblici, all'interno del quale ne sono stati identificati due con destinazione d'uso diversa e ritenuti adatti allo sviluppo dell'attività: una scuola elementare e un edificio uso ufficio. Sia nella scuola che nell'ufficio si è predisposto un monitoraggio a livello di intero edificio, un monitoraggio a valle dei sistemi energetici ed un monitoraggio/attuazione a livello di singole utenze o gruppi di utenze. L'attività ha portato alla definizione di un kit minimo di monitoraggio, di facile installazione, configurazione e di basso impatto, in grado di identificare un equilibrio tra la quantità/qualità della strumentazione installata in campo e i relativi costi, individuando una soluzione capace di operare processi diagnostici efficaci e realisticamente esportabile sul mercato in contesti urbani e applicabile in edifici con diversa destinazione d'uso.

Inoltre, è stata prodotta una verifica del corretto funzionamento della sensoristica del sistema di monitoraggio energetico e ambientale indoor implementato sul distretto di edifici presso il centro ENEA della Casaccia. L'analisi

condotta ha fornito risultati positivi: malgrado la presenza di alcuni errori e dati di monitoraggio mancanti, nel complesso la verifica effettuata ha confermato l'attendibilità dei dati al fine della loro successiva elaborazione.

Infine, l'analisi dei dati raccolti per mezzo del sistema di monitoraggio installato su un cluster di 8 edifici si è concentrata sull'andamento dei profili di consumo, e sulla valutazione e il confronto di indicatori di prestazione energetica attraverso lo sviluppo di un modello di regressione multipla a due variabili indipendenti atto a identificare un "piano medio" di prestazione.

Le attività di ENEA hanno riguardato la validazione di metodologie di diagnostica e controllo su un singolo edificio, l'ampliamento delle funzionalità dello "Smart Village Casaccia", sviluppo di moduli di calcolo delle presenze, l'analisi di scenari di "active demand" e partecipazione ai network europei.

Validazione metodologie di diagnostica e controllo su un singolo edificio

Nell'ambito della diagnostica degli impianti di illuminazione degli edifici è stato implementato, all'interno dell'architettura ICT sviluppata nei PAR precedenti (RdS/2012/053), il sistema di rilevazione automatica delle anomalie, applicabile ad edifici nel settore terziario, secondo la metodologia proposta in RdS/2011/323 e RdS/2012/229. Nella presente annualità ENEA ha implementato, tramite codice JAVA, un metodo sicuro e affidabile in grado di individuare in modo automatico e in tempo reale eventuali irregolarità, evidenziandone anche la criticità, e risalire alle cause che le hanno generate in maniera diretta, rapida e semplice senza dispersione di forze e di tempo per la ricerca e la localizzazione del guasto. Il processo di diagnostica, a partire dai dati acquisiti dalla sensoristica installata in situ, definisce i preprocessing, indicatori di grandezze fisiche o meno che descrivono lo status in cui si trova il sistema; si passa alla fase del situation assessment mediante la combinazione di vari preprocessing che esplica, ad un livello superiore, la condizione contingente dell'edificio; infine si giunge all'individuazione delle cause, come aggregazione di situazioni precedentemente evidenziate, che riportano la motivazione per la quale si è verificato un evento anomalo. Sono state apportate, inoltre, delle modifiche al processo di rilevamento degli outlayer di potenza elettrica sottoposti all'analisi diagnostica suddetta. Il modello è stato validato sui consumi elettrici (linea luci) dell'edificio F40 durante il mese di marzo 2013 valutandone i risultati finali ottenuti, come il numero di anomalie riscontrate, focalizzando l'attenzione sulle fasce orarie in cui si sono maggiormente verificate. Al momento tale modulo è pienamente operativo e funzionante in tempo reale sull'edificio. Le attività del prossimo PAR riguardano la sua validazione sui consumi termici e l'applicazione alla rete di edifici.

Nell'ambito del controllo automatico è stata sviluppata ed implementata da ENEA una strategia di controllo adattivo dell'illuminazione dell'edificio F40 del Centro Ricerche ENEA Casaccia basandosi su dati monitorati e uno storico acquisito in precedenza. Una volta sviluppata e collaudata, questa strategia è stata implementata in linguaggio JAVA per poi essere esportata sulla piattaforma integrata "Smart Town" (RdS/2011/323) che gestisce l'illuminazione dell'edificio F40. Lo sviluppo di una strategia di controllo automatico è stato diviso in più fasi:

- individuazione dei parametri fondamentali;
- studio degli andamenti dei vari parametri e loro eventuali correlazioni;
- valutazione della rilevanza di ogni parametro;
- identificazione di una o più regole di controllo;
- stima del risparmio energetico/economico.

L'ultimo punto è estremamente importante perché fornisce un'indicazione dell'efficienza della regola di controllo nel caso specifico, anche se è importante tenere conto di tutte le possibili applicazioni.

Sono state sviluppate due regole di controllo:

- accensione/spengimento delle luci dei corridoi in base ai dati di presenza;
- accensione/spengimento delle luci degli uffici in base alla luce solare.

Lo sviluppo della prima regola si è basato sull'analisi dei dati registrati nei 10 mesi precedenti; questa regola è stata implementata ed è tuttora in funzione. Per sviluppare la seconda regola è stato necessario creare un modello tridimensionale dell'edificio (modello che include caratteristiche geometriche, geografiche e fisiche) per simulare l'andamento della luce naturale all'interno delle stanze durante l'anno; questi dati sono stati poi modellizzati tramite approccio analitico. I risultati sperimentali hanno mostrato un risparmio del 70% rispetto al controllo manuale e del 20% rispetto ad un controllo di tipo statico basato su programmazione oraria fissa.

Implementazioni di funzionalità di controllo ottimale dello Smart Village

In questa attività, in collaborazione con l'azienda GIED, sono stati implementati i sistemi di attuazione e controllo per la gestione energetica del network di edifici dello Smart Village presso il C.R. Casaccia (Figura 376) così da permettere nelle prossime annualità la sperimentazione delle metodologie sviluppate. La rete di edifici interessati comprende un cluster di otto edifici ed uno smart building altamente sensorizzato, l'edificio F40, già realizzati nei PAR 2008-2009 e 2011, a cui si è aggiunto l'edificio F64 realizzato grazie alla stipula di accordi di paternariato con aziende private che hanno aderito alla manifestazione di interesse per sviluppare congiuntamente con ENEA applicazioni smart a titolo gratuito.



Figura 376. Rete di edifici dello Smart Village Casaccia

Le implementazioni realizzate in questa annualità, consentono il controllo ottimizzato e remoto dei set point dei BEMS installati presso la rete degli edifici per la gestione ottimale delle utenze di climatizzazione e illuminazione e per attuare le richieste dell'active demand. In particolare nelle centrali termiche degli edifici F40 e F64, sono state installate nuove centraline elettroniche in grado di dialogare con la piattaforma di controllo posta presso una control room, per la gestione ottimale della climatizzazione estive ed invernale. Nell'edificio F40 è stato predisposto il controllo delle condizioni indoor del singolo ambiente implementando la piattaforma di controllo dell'edificio. Presso l'F64 sono stati implementati i dispositivi elettronici per il controllo e attuazione da remoto degli usi finali. Infine è stata integrato il sistema di smart lighting outdoor grazie alla messa a punto ottimale della linea di alimentazione dei lampioni della Smart Street per consentirne il controllo adattivo da remoto.

Elaborazione dei flussi sulle strade del centro Casaccia

In questa attività è stato sviluppato in collaborazione con Harpa Italia un modulo che effettua l'analisi dei flussi sulle strade del centro, ovvero elabora in tempo reale il numero di persone che fluiscono sugli archi tra i vari nodi ed elabora i profili medi orari su base mensile. Tale software legge sul DataBase i percorsi origine-destinazione (attività sviluppata nel PAR 2011 - RdS/2012/053) e sulla base di questi ricostruisce i flussi su ogni arco dei grafi dei percorsi verso i tre ingressi e la mensa salvando i risultati dell'elaborazione su un apposita tabella del database. Tale modulo software è stato quindi integrato nella piattaforma "Smart Village" ed è pienamente operativo.

Sviluppo moduli di visualizzazione

In questa attività è stato sviluppato dalla ditta Harpa Italia, un modulo software prototipale per la raccolta e visualizzazione di eventi legati ad anomalie sui consumi energetici rilevate dai moduli di diagnostica real-time. In quest'anno è stato sviluppato principalmente un connettore che estrae le informazioni di diagnostica dal Village database e li converte in un file XML secondo lo standard CAP (Common Alerting Protocol). Tale file può essere inviato quindi a tutti quei sistemi di visualizzazione che adottano questo standard staccando in tal modo le funzioni e rendendo il sistema maggiormente interoperabile.

Inoltre, è stato sviluppato un modulo prototipale che tramite un'interfaccia grafica (GUI) consente la visualizzazione su mappa degli eventi CAP generati che rende possibile capire in modo rapido ed immediato quando, dove e con che gravità un evento si è verificato.

Sviluppo moduli di calcolo delle presenze

Per poter estendere le funzionalità di diagnostica e controllo adattivo ad una rete è stata realizzata un'attività che ha avuto come oggetto lo sviluppo di moduli software per il calcolo orario delle presenze in una rete di edifici. Tale software legge sul database i percorsi origine-destinazione (attività sviluppata nel PAR 2011 - RdS/2012/053) e sulla base di questi ricostruisce il numero di persone realmente presenti in ogni edificio della rete. Gli algoritmi di base sono stati implementati direttamente come "stored procedures" sul data base ed è quindi indipendente dalla piattaforma software che poi utilizzerà il dato.

Definizione scenario teorico di "active demand"

Nell'ambito delle attività connesse allo sviluppo di una metodologia per la gestione ottimale di una rete di edifici terziari controllati da un unico gestore, si è sviluppata una metodologia basata sul concetto di "domanda attiva".

Tale attività rappresenta la continuazione dello sviluppo della metodologia introdotta nei precedenti programmi di ricerca (RdS/2012/053) all'interno dei quali è stata realizzata presso il C.R. Casaccia una rete di dieci edifici.

Il programma di questa annualità mira a sviluppare la piattaforma di controllo ed ottimizzazione della rete che sia in grado di interagire con i fornitori energetici (elettrici o termici) per attuare politiche di controllo della domanda basate su una modellistica avanzata.

L'obiettivo è quello di conseguire il risparmio energetico grazie alla modulazione dell'erogazione dell'energia in funzione della domanda che diviene parte attiva del sistema in quanto resa flessibile e adattabile.

Grazie al monitoraggio real-time delle condizioni ambientali indoor e outdoor e alla ricostruzione della richiesta e delle abitudini dell'utenza, è possibile elaborare dei modelli predittivi della domanda che permettono di ridurre i carichi nei casi in cui venga richiesto dal fornitore di energia sia per motivi di emergenza sia perché, un eventuale riduzione della richiesta di energia in concomitanza di picchi previsti, può essere premiata dallo stesso fornitore.

Per ottenere tale risultato sono stati sviluppati algoritmi per l'ottimizzazione dei set point dei BEMS (Building Energy Management System) installati. In tal modo la richiesta di energia per climatizzazione, illuminazione e forza motrice viene controllata ed ottimizzata dinamicamente minimizzando il discomfort per gli utenti.

La piattaforma di ottimizzazione può infatti intervenire sui set point dei BEMS programmando orari di spegnimento e accensione, impostando le temperature dei sistemi di scambio termico nelle centrali termiche o dei singoli ambienti. In tal modo si riduce la richiesta energetica degli utenti che accettano una piccola riduzione del proprio comfort ricevendo in cambio un risparmio sul costo dell'energia.

Diffusione dei risultati in contesti internazionali

ENEA ha proseguito l'attività di partecipazione alle reti di ricerca europee con particolare riferimento al tema della gestione ottimale di reti di edifici, infatti essa è membro della rete EERA, dove svolge un ruolo di coordinamento primario, e delle Stakeholder Platforms delle Industrial Initiatives.

A tal riguardo ENEA si è proposta come punto di riferimento Italiano a servizio degli amministratori locali e degli operatori industriali per lo sviluppo di una metodologia di valutazione e di implementazione di iniziative e progetti Smart City, nonché di coordinamento e sinergia nella partecipazione a network italiani ed europei relativi in particolare al tema delle reti di edifici e distretti ("Joint Program EERA Smart City", "Smart City Stakeholders Platform", "Urban Europe", "Member State Smart City Initiative", "Covenant of Mayors"). L'attività, svolta da Koba srl, ha riguardato lo sviluppo di una metodologia di valutazione e di implementazione di iniziative e progetti smart city, nonché di coordinamento e sinergia nella partecipazione a network italiani ed europei relativi in particolare al tema delle reti di edifici e distretti per la loro applicazione nei contesti urbani.

Nell'ambito del Joint Program EERA "Smart City" ENEA svolge un ruolo di coordinamento dell'Urban Energy Networks Subprogramme finalizzato all'integrazione tra diverse reti urbane. In questo ambito a dicembre 2012 ENEA ha organizzato a Roma il Workshop dell'intero Joint Program a cui hanno partecipato oltre 100 università, istituzioni ed aziende europee. Durante questo evento è stato lanciato il progetto "Smart Village Casaccia" come il primo laboratorio europeo per Smart City.

Nell'ambito della Joint Programming Initiative "Urban Europe" ENEA svolge un ruolo di supporto al Governing Board finalizzato alla promozione di tematiche relative ai distretti energetici in aree urbane. In questo ambito a maggio 2013 ENEA ha organizzato a Roma il Workshop all'interno della Conferenza REAL CORP a cui hanno partecipato circa 100 università e centri di ricerca europei. Durante il workshop è stata lanciata l'adesione del MIUR al finanziamento dei bandi 2013 della JPI Urban Europe.

In stretta connessione con le attività di sviluppo e sperimentazione di sistemi intelligenti per la gestione di reti di edifici terziari, l'Università di Bologna Dipartimento DICAM ha sviluppato un'attività che ha visto la realizzazione di una piattaforma di tipo open source per la validazione dei contenuti di progetti di ricerca in ambito "tecnologie e città smart", costituita da un database di progetti smart, basato su interfaccia web e su un sistema di classificazione opportunamente sviluppato. L'incarico affidato si è articolato attraverso le seguenti azioni:

- la progettazione fisica (schema fisico) del data base;
- l'implementazione (database dedicato, database replicato, accesso diretto a fonti dati comuni);
- la validazione, verifica e collaudo;
- il funzionamento.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti da ENEA per quanto attiene al presente obiettivo è contenuta nel rapporto RdS/2013/119.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

L'attività ha riguardato le seguenti linee di ricerca, tutte mirate all'aumento dell'efficienza energetica e al contenimento dei consumi con l'illuminazione artificiale:

1. studio di materiali e di componenti per costruire prodotti efficienti (con gli OLED);
2. progettazione di prodotti efficienti e loro utilizzo in impianti efficienti (COELO, HUMBLEBEE, e inoltre STAPELIA e PLUS ME), e sulla risposta del sistema visivo umano agli stimoli spaziali e spettrali legati all'illuminazione, alla ricerca di una misura per quantificare la qualità e l'affidabilità di una sorgente di luce in dipendenza dell'applicazione e per comprendere l'influenza delle nuove sorgenti luminose sulle prestazioni cognitive;
3. sviluppo di azioni finalizzate a sperimentare e favorire la più ampia diffusione fra operatori economici e istituzioni di strumenti tecnico-procedurali mirati all'efficienza energetica nel settore dell'illuminazione (progetto Lumière, con sviluppo di tool per i Comuni).

Materiali e componenti utilizzati per l'emissione e la trasmissione della luce

Per la fabbricazione di OLED con caratteristiche sempre migliori, in particolare con emissione intensa ed efficiente di luce blu, c'è necessità di esplorare nuovi materiali organici attivi. Una famiglia molto interessante da questo punto di vista è quella dei triazatruxeni (TAT), che presentano generalmente fluorescenza blu e buona stabilità termica.

Al Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli "Federico II" è stato sintetizzato un materiale innovativo luminescente nella regione blu del visibile ed appartenente alla famiglia dei triazatruxeni. Tale materiale è stato caratterizzato dal punto di vista spettroscopico e di stabilità termica. Sono state definite inoltre le condizioni di processo per depositare tale materiale in forma di film sottile. L'attività inerente la fabbricazione di dispositivi OLED, utilizzando il TAT come materiale attivo, è stata successivamente svolta da ENEA (C.R. Portici).

I due nuovi isomeri TAT, indicati come 1aNH e 1bNH (Figura 377) mostrano entrambi fluorescenza nel blu (Figura 377) e risultano termicamente stabili.

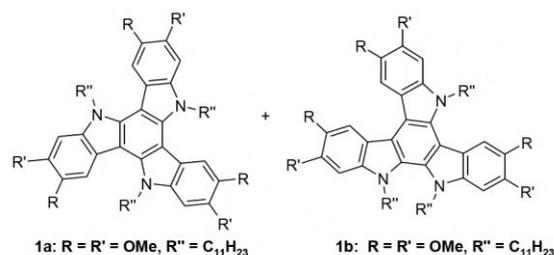


Figura 377. Isomeri TAT 1a e 1b

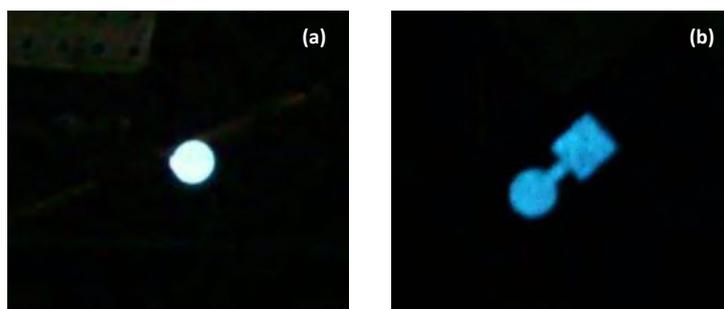


Figura 378. Fotografie di OLED utilizzanti (a) blend PVK:TAT 1b 5:1, (b) PFO:TAT 1b di 5:2

Il TAT 1b è stato inserito quale strato attivo elettroluminescente nella realizzazione di vari tipi di OLED, sia applicandolo da solo sia in blend con un polimero, PVK o PFO, con rapporti di concentrazione in peso polimero: TAT di 5:1 o di 5:2. L'obiettivo era quello di avviare la sperimentazione di questi nuovi materiali, cercando di identificare una struttura di dispositivo che presentasse emissione blu con buone caratteristiche di intensità e di efficienza.

I diversi tipi di dispositivi hanno funzionato quasi tutti, benché con prestazioni inferiori a quelle attese. Molto probabilmente le blend provate non sono ottimali per fornire le migliori prestazioni per questi materiali e dispositivi. Si ritiene che possa essere comunque interessante continuare la sperimentazione con questi materiali, ed in generale con questa famiglia di TAT, per le potenzialità che essi mostrano, sia per il colore della luce prodotta sia per la stabilità termica ed ambientale mostrata, dedicando attività sia alla sintesi di ulteriori nuove molecole, sia al miglioramento della struttura degli OLED in cui utilizzare tali materiali, per incrementare le prestazioni dei dispositivi ottenuti, in termini di luce generata ed efficienza.

I dettagli tecnici e le relative conclusioni sono ampiamente descritti nel rapporto RdS/2013/115.

Progettazione eco-compatibile di un apparecchio a LED

COELO

Una prima attività ha portato alla progettazione del sistema di illuminazione modulare a LED Chiamato “COELO”, COMfortable, Efficient Experiential Lighting for Office (rapporto RdS/2013/113). Il concetto di modularità prosegue una linea di pensiero percorsa nelle precedenti annualità²². Qui il motore luminoso può ospitare due differenti tecnologie, in modo che possa essere un valido sistema di valutazione delle diverse possibilità tecniche offerte dal mercato a parità di condizioni al contorno. Il sistema progettato risulta modulare e riconfigurabile e prevede l'utilizzo di un numero di elementi diversi ripetuti e assemblati in maniera tale da costituire la configurazione desiderata. In particolare, sia il riflettore, sia gli elementi di cover superiore sono stati studiati al fine di poter essere opportunamente montati per soddisfare diverse soluzioni di design.

La ricerca progettuale è stata affidata al Politecnico di Milano Dipartimento di Design, l'obiettivo era la progettazione di un sistema di illuminazione generale, con particolare attenzione alla parte ottica e alla definizione della prestazione luminosa, basato su tecnologia LED. La progettazione è stata preceduta da una ricerca sullo stato dell'arte dei sistemi a fosfori remoti e altri sistemi di generazione di luce bianca mediante tecnologia allo stato solido per individuarne pregi, difetti, indicazioni applicative e valutarne le performance in termini di resa cromatica, efficienza, comfort visivo e aspetti fisiologici circadiani dell'illuminazione artificiale negli interni, scuole e uffici in particolare.

HUMBLEBEE

Questa attività di ricerca è stata incentrata sulla progettazione di un innovativo sistema di illuminazione per ambienti interni che coniugasse l'uso di apparecchi di illuminazione a fosfori remoti ed un sistema di controllo Smart wireless per la gestione dell'impianto di illuminazione, e alla realizzazione presso un'utenza reale costituita dal laboratorio ICELAB-FIRELAB dell'ENEA. Gli obiettivi sono quelli di qualità della luce, sensibilità ambientale ed efficienza energetica applicati a una utenza di “laboratorio”.

La scelta di utilizzare fosfori remoti per l'illuminazione di interni è parte della ricerca stessa del presente PAR. La scelta di progettare un sistema di controllo smart scaturisce dall'esigenza di realizzare un impianto di illuminazione regolato ed ottimizzato affinché durante il suo utilizzo permetta di contenere i consumi di energia elettrica e ridurre gli sprechi, migliorando le condizioni luminose e visive sulle aree di lavoro in base alle reali necessità degli operatori. Si è optato per un sistema di controllo che sfruttasse al meglio le tecnologie di ultimissima generazione (quali sensoristica, applicazioni web, regolazioni manuali ed automatiche, impostazione di scenografie, etc..) e l'elevata flessibilità che la trasmissione wireless può offrire garantendo comunque affidabilità e robustezza del funzionamento del sistema.

E' stata contattata la ditta NERI per la realizzazione degli apparecchi e lo sviluppo del sistema di controllo²³.

Il sistema di illuminazione HUMBLEBEE è stata progettato per essere installato ed utilizzato nella Hall tecnologica dell'ENEA di Ispra, un locale, assimilabile ad un ambiente industriale, che contiene i laboratori ICELAB e FIRELAB dedicati a test su elettrodomestici. L'area di lavoro dei tecnici e dei ricercatori, che svolgono attività sperimentale, è focalizzata all'interno delle 3 camere climatiche e nelle due aree di lavoro (banchi da lavoro) utilizzate per la preparazione del materiale da testare. Attualmente è installato un impianto tradizionale costituito da apparecchi a vapori di mercurio ad alta pressione), che saranno sostituiti dal nuovo impianto con gli apparecchi a fosfori remoti.

Il sistema di illuminazione HUMBLEBEE è così caratterizzato:

- apparecchi di illuminazione con tecnologia a fosfori remoti high-bay. L'impianto è progettato per garantire un livello di illuminamento medio mantenuto sul piano di lavoro secondo normativa. Gli apparecchi sono progettati ad hoc per equipaggiare i sensori di presenza, i dispositivi elettronici per la comunicazione wireless e l'antenna;
- un sistema di controllo dedicato alla gestione e alla regolazione manualmente ed automatica degli apparecchi di illuminazione. Il sistema utilizza il protocollo di comunicazione wireless ZigBee e comunica via radio con tutti i dispositivi presenti nella sua rete, quali i sensori di presenza, i fotosensori, gli attuatori ed i dispositivi che consentono la regolazione manuale e l'interazione con il sistema (tablet, smartphone, touch screen). La verifica dei consumi energetici è possibile per mezzo di appositi contatori di grandezze elettriche

²² Per l'illuminazione di esterni.

²³ Sono stati utilizzati dispositivi a fosfori remoti di Intematix.

nel quadro elettrico dell'impianto di illuminazione. Inoltre, il sistema è predisposto anche per la memorizzazione di alcune variabili appositamente definite (malfunzionamenti, valori di illuminamento, stati di presenza, interazioni manuali con il sistema) per consentire una completa valutazione del funzionamento del sistema. Logiche di controllo manuale e automatica, per accensione/spengimento degli apparecchi di illuminazione; dimmerazione del flusso luminoso emesso dalle sorgenti luminose; regolazione della Temperatura Correlata di Colore delle sorgenti luminose. Il sistema di controllo Smart prevede la programmazione con scene luminose (ad esempio una scena giornaliera e una scena notturna).

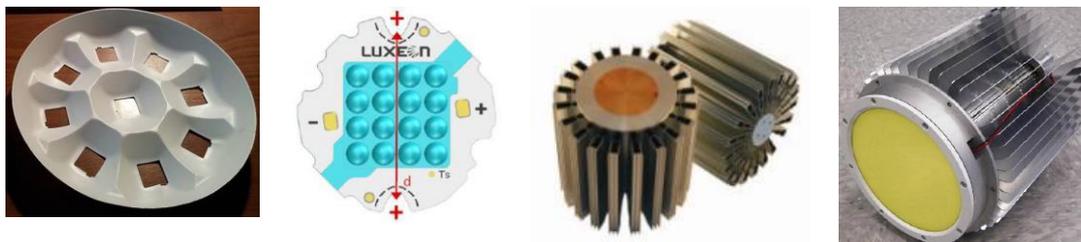


Figura 379. L'apparecchio di illuminazione e alcuni elementi costitutivi

L'apparecchio è High-Bay, con flusso luminoso di circa 22,4 km, 110 lm/W (a parte le perdite dell'alimentatore), emissione lambertiana anche l'emissione della sorgente (vetro) con apertura 115° del fascio luminoso. Si è quindi optato di non inserire un sistema ottico addizionale per direzionare la luce nell'ambiente.

Il progetto illuminotecnico è stato propedeutico al dimensionamento corretto dell'impianto di illuminazione e quindi alla progettazione/sceita degli apparecchi a fosfori remoti. Dopo aver individuato le aree di lavoro, definito i coefficienti di riflessione luminosa delle pareti e delle superfici di lavoro ed aver realizzato il modello 3D della Hall tecnologica, sono state identificate le superfici di calcolo necessarie per il software per effettuare i calcoli illuminotecnici. I requisiti illuminotecnici di progetto, verificati con la simulazione, sono il valore dell'illuminamento medio mantenuto (E_m) pari a 300 lx e l'uniformità degli illuminamenti (U_o) pari a 0,60 (crf. normativa EN 12464-1:2012). La Figura 380 rappresenta un esempio di output 3D dei calcoli illuminotecnici eseguiti con il software di simulazione, con la superficie di calcolo posizionata ad 1 metro dal pavimento (altezza delle aree di lavoro) ed i valori di illuminamento puntuale calcolati sulla griglia dei punti che giacciono sulla superficie stessa.

Il passo successivo, che consentirà di verificare le prestazioni di tale sistema e quindi di monitorarne il funzionamento, è l'installazione del sistema. Nel prossimo anno di ricerca, appena il sistema sarà installato, si procederà alla programmazione, alla messa in servizio ed all'avvio dell'attività di monitoraggio che consentirà di verificare le prestazioni energetiche, ambientali ed il corretto funzionamento del sistema di illuminazione HUMBLEBEE.

Nell'annualità precedente²⁴ è stato progettato PLUS ME, sistema modulare a LED per strade a traffico motorizzato all'interno dell'illuminazione urbana. A sua volta PLUS ME è lo sviluppo di un concetto più generale di sistema di illuminazione modulare e di relativa gestione intelligente, che aveva in passato portato alla realizzazione di PLUS e PLUS SENSE. In questa annualità il Politecnico di Milano Dipartimento di Design ha fornito supporto tecnico scientifico all'ENEA per la prototipazione industriale del prodotto PLUS ME. La ditta Neri, che aveva già realizzato PLUS SENSE nell'annualità precedente²⁵, ha realizzato un prototipo, da utilizzare per sperimentazioni, con base dissipatore in alluminio (fusione) e coppa in PMMA (termoformatura), collaborando in modo attivo al progetto.

I dettagli tecnici e le relative conclusioni sono ampiamente descritti nel rapporto RdS/2013/112.

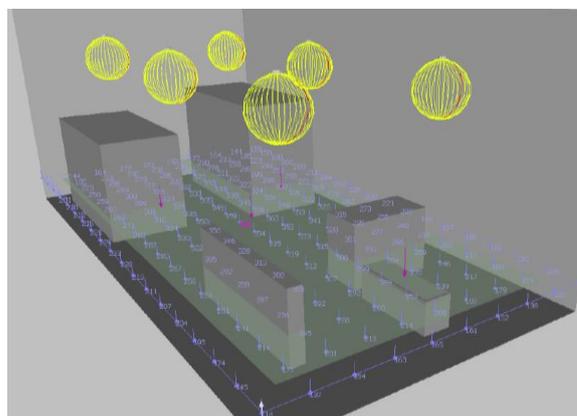


Figura 380. Output 3D del software di simulazione con calcoli eseguiti sulla superficie di calcolo. Solidi fotometri 3D degli apparecchi (giallo)

²⁴ Collaborazione ENEA – Politecnico di Milano

²⁵ Sulla base di PLUS realizzato da Crosspoint

STAPELIA

Le attività sul dispositivo fotovoltaico “Stapelia” delle precedenti annualità sono state completate con il montaggio di un esemplare presso l’ENEA di Ispra. Per la realizzazione sono state fatte alcune variazioni funzionali: ad es. la batteria inserita nel corpo del fiore è in un contenitore parallelepipedo, sono stati migliorati i circuiti di carica, il circuito crepuscolare e la batteria, è stata realizzata la retroilluminazione RGB della corolla. Naturalmente tutte le modifiche puramente estetiche sono da considerarsi provvisorie e variabili in funzione degli eventuali sviluppi futuri del progetto.



Figura 381. Alcune immagini di Stapelia all’ENEA di Ispra

Risposta del sistema visivo umano a stimoli spaziali e spettrali legati all’illuminazione

Una prima attività ha riguardato la resa dei colori legata al contesto, attraverso test di percezione visiva, in collaborazione con l’Università di Milano Dipartimento di Informatica, basati sul fatto che il calcolo del CRI si basa unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce e non tiene conto di come la luce si distribuisce nella scena e di come il nostro sistema visivo elabora la scena percepita. L’Università ha investigato la base teorica dell’esperimento, ha definito la procedura sperimentale (ENEA ha apportato alcune variazioni operative) e predisposto parte del materiale per i test. L’attività sperimentale è stata svolta da ENEA presso il suo laboratorio a Ispra, comprendendo sia i test con gli individui sia la caratterizzazione fotometrica e spettrale delle sorgenti. L’analisi dei dati è stata svolta essenzialmente dall’Università, con contributi ENEA.

Sono stati svolti quindi alcuni esperimenti percettivi volti a testare quanto tali aspetti spaziali impattassero sulla resa dell’apparenza cromatica, al cambiare dell’illuminante, per il calcolo dell’indice di resa cromatica, al punto che due stimoli identici osservati in condizione di illuminazione diversi o in contesti diversi possono apparire differenti.

L’esperimento, che ha coinvolto 87 partecipanti, consisteva nel confronto di stampe di riferimento con stampe contenenti una serie di campioni. I test si sono svolti in quattro cabine di luce, internamente bianche, disposte in un locale quasi completamente buio (figura 382). Sono state testate sette sorgenti luminose (CFL-i, LED, alogeni) all’interno delle 4 cabine, dopo averne misurato in laboratorio le caratteristiche fotometriche e spettrali.



Figura 382. Setup dell’esperimento sulla resa cromatica e una fase dello stesso

L’analisi dei dati mette in evidenza come il cambio dell’illuminante provochi uno spostamento dell’apparenza disomogeneo e non lineare. Una diversa luce cambia l’apparenza di patch identiche in modo diverso a seconda non solo dell’interazione tra riflettanza ed illuminante ma anche del contesto in cui la patch si trova. Anche la diversa distribuzione spaziale con cui sono state organizzate le due scale usate per la determinazione dell’apparenza delle patch campione ha portato a differenze nella valutazione finale dell’apparenza. I risultati

hanno quindi evidenziato un'influenza del contesto come ipotizzato, ma la complessità dei dati analizzati ha indicato una dipendenza spaziale difficile da caratterizzare e quantificare con modelli semplici o lievi modifiche a modelli preesistenti. La lettura e la comprensione dei dati risultanti dagli esperimenti compiuti suggeriscono di approfondire ulteriormente l'effetto del contesto attraverso ulteriori esperimenti, prima di procedere con lo sviluppo di un nuovo indice di resa cromatica che tenga in considerazione i colori non solo nelle loro caratteristiche globali di riflettanza ma anche locali di contrasto spaziale, considerando la loro disposizione all'interno della scena.

Da questo esperimento è emersa chiaramente la necessità di proseguire nella ricerca e nella sperimentazione riguardante le misure di resa cromatica delle sorgenti luminose, tenendo in considerazione il contesto di visione e la distribuzione spaziale dei colori all'interno della scena.

Una seconda attività ha riguardato gli effetti delle nuove sorgenti luminose a LED, in particolare di quelle il cui spettro è ricco di lunghezze d'onda corte (blu), sulle prestazioni cognitive degli esseri umani (rapporto RdS/2013/109), che ha coinvolto 44 partecipanti.

Gli effetti della luce con spettro ricco di luce blu non si limitano all'azione sui ritmi circadiani, ma hanno effetti anche sull'allerta e sulla vigilanza. Tuttavia gli effetti dell'esposizione alla luce blu sulle abilità visuo-spaziali e sulle funzioni esecutive sono ancora parzialmente inesplorate. Poiché le nuove sorgenti luminose potrebbero essere adottate soprattutto in tali contesti lavorativi, l'assenza di indagini scientifiche rispetto all'effetto di queste lampade sulle abilità spaziali e sulle funzioni esecutive umane può rappresentare una forte limitazione sulla conoscenza degli effetti a breve e a lungo termine.

L'Università di Roma Sapienza Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) ha realizzato questa attività e i risultati sperimentali sono stati condivisi con ENEA. I primi risultati sembrano indicare che l'esposizione a un'illuminazione con uno spettro a elevata composizione spettrale nel blu, come le sorgenti a LED, migliora le prestazioni riducendo gli errori e permettendo multiple rappresentazioni mentali.

I dettagli tecnici e i risultati delle attività ENEA sono ampiamente descritti nel rapporto RdS/2013/114.

Progetto Lumière: sviluppo di un tool per la qualità di gestione degli impianti illuminotecnici



Lumière è un Progetto sviluppato dall'ENEA con l'obiettivo di promuovere l'efficienza energetica nella pubblica illuminazione e, alla luce della consapevolezza e competenza acquisita nel corso dell'attività progettuale in merito alla configurazione e peculiarità del settore, impostare un "programma" di gestione efficiente ed efficace del servizio di pubblica illuminazione²⁶.

L'attività svoltasi nel corso di quest'anno ha mirato a:

- a. ampliare il Network Lumière, rafforzando l'integrazione e la collaborazione consultiva ed operativa dei "partner", per consolidare e "formalizzare" maggiormente le attività congiuntamente proposte, analizzate, sviluppate e/o realizzate;
- b. trasformare il "Percorso Lumière" di efficientamento energetico degli impianti di pubblica illuminazione in un vero e proprio "Programma di amministrazione efficiente ed efficace della luce pubblica", da realizzarsi attraverso la definizione e sviluppo di un organismo di supporto alle pubbliche amministrazioni ed istituzioni per la gestione del servizio di pubblica illuminazione - Osservatorio Lumière;
- c. rafforzare e concretizzare l'intervento del Progetto sul territorio nazionale mediante la realizzazione d'interventi formativi presso le amministrazioni; il coinvolgimento dei Comuni nell'efficientamento - energetico ed operativo - dei processi gestionale del territorio di loro competenza; lo sviluppo di *Progetti Pilota* al fine di verificare la validità del percorso/prodotti Lumière e creare dei Comuni di riferimento per quelle amministrazioni interessate a gestire in modo efficiente ed efficace il servizio di pubblica illuminazione;
- d. completare l'analisi delle problematiche che gli operatori del settore riscontrano ed incontrano nella gestione del servizio di pubblica illuminazione, al fine di poter individuare e proporre soluzioni, sviluppare format di riferimento condivisi e, quindi, perfezionare maggiormente il percorso ed il Programma Lumière. In particolare l'attività si è concentrata sullo sviluppo di un tool per migliorare la qualità di gestione degli impianti attraverso la possibilità di conoscere lo stato dell'impianto e le sue modalità di gestione,

²⁶ Progetto Lumière, www.progettolumiere.enea.it

comprendere le diverse variabili in gioco al fine di poter delineare dei percorsi ottimizzati in funzione delle reali esigenze e potenzialità di mercato, valutare le possibilità d'integrazione con tecnologie smart ed infine valutare e raffrontare parametri economici ed ambientali differenti.

- e. partecipare attivamente e formalmente all'attività del Patto dei Sindaci, la cui richiesta di collaborazione si è ufficializzata nel giugno 2013.

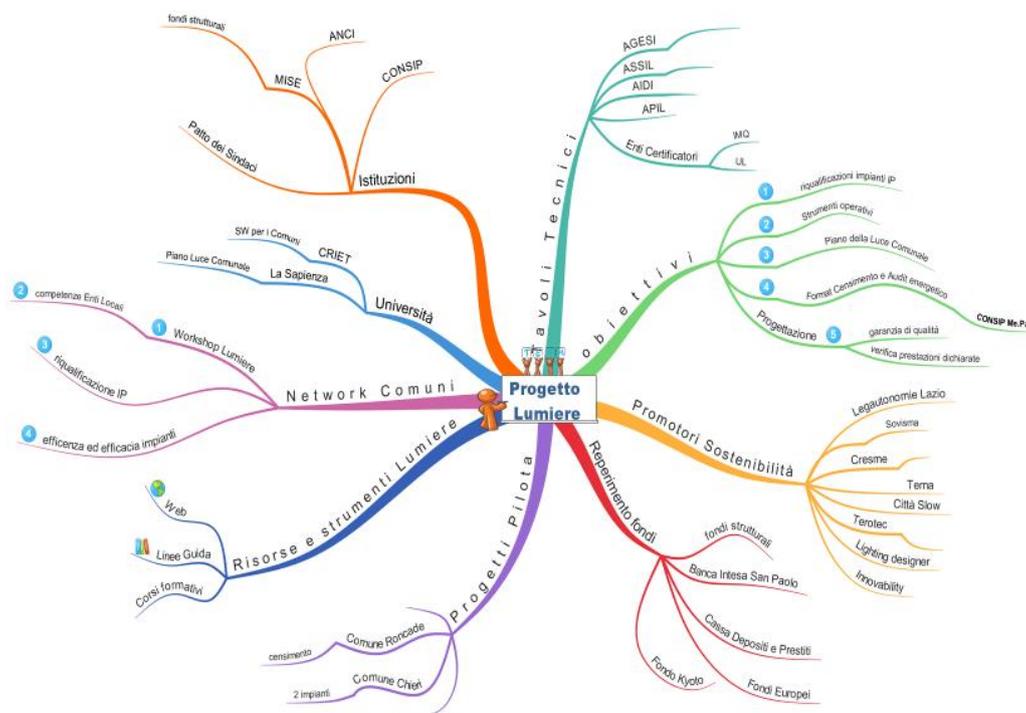


Figura 383. Schema del Progetto Lumière

I maggiori risultati conseguiti dal Progetto nel corso della presente annualità:

- trasformazione del Progetto Lumière in un vero e proprio Programma operativo di gestione degli impianti di pubblica illuminazione,
- consolidamento di un Network operativo, condiviso, del quale ci viene richiesta una formalizzazione dai maggiori operatori del settore,
- gratuità di tutte le collaborazioni offerte, sia per lo sviluppo delle attività sia dei prodotti delle Linee guida sia degli eventi formativi, informativi e diagnostici degli impianti;
- conquista della fiducia da parte degli operatori del settore, coinvolti con entusiasmo, professionalità ed impegno in un percorso volto a cambiare le modalità di amministrazione della luce pubblica ed il ruolo degli impianti, diventando pertanto un punto di riferimento certo e di supporto per il settore.
- e infine, Lumière guarda e contribuisce al futuro Smart delle nostre città.

Gli incontri con i Comuni hanno permesso di ottenere feedback da parte dei responsabili comunali in merito alle criticità riscontrate nella gestione degli impianti di pubblica illuminazione. Per fornire un supporto concreto nell'amministrazione della rete d'illuminazione e favorire il processo di efficientamento della stessa, il Team Lumière ha ritenuto opportuno sviluppare di una famiglia di programmi: i *City Profiler* (CP). Questo pacchetto di software, suddiviso in moduli semplifica la gestione dei dati inerenti gli impianti, supporta la programmazione degli interventi di riqualificazione energetica nonché, obiettivo per le prossime annualità, consente il controllo e il monitoraggio delle prestazioni energetiche a seguito delle riqualificazioni.

CRIET, con la collaborazione di alcuni partner del Progetto Lumière, ha ideato e realizzato i primi due prodotti della famiglia *City Profiler*: il *City Performance Profiler* (già disponibile) e, in questa annualità, il *City Public Lighting Profiler*. Nello specifico, il *City Public Lighting Profiler* propone ai Comuni un tableau de bord che, oltre a coadiuvarli nell'individuazione delle attività da intraprendere per ottenere i risultati desiderati, mostra i risparmi conseguibili grazie agli interventi di riqualificazione.

Nel corso del 2013 CRIET e ENEA hanno utilizzato il *City Public Lighting Profiler* per effettuare delle valutazioni sulla rete di pubblica illuminazione di Roncade (TV). E' stato quindi realizzato il censimento sulla consistenza e

condizione degli impianti comunali e l'amministrazione ha provveduto alla realizzazione di un Piano della Luce grazie al quale sono stati individuati gli interventi necessari per adeguare ed efficientare la rete di pubblica illuminazione. Il *City Public Lighting Profiler* ha quindi permesso di stimare i vantaggi conseguibili una volta terminato il processo di riqualificazione.

Per i dettagli tecnici e le conclusioni relative a questa attività si rimanda ai rapporti RdS/2013/110 e 111.

d. Tecnologie per l'industria del freddo

Circa l'80% dei prodotti alimentari avviati al consumo sono stati prodotti o trasformati presso stabilimenti dotati di attrezzature frigorifere. E' evidente, dunque, che il settore della refrigerazione ed in particolare tutti gli impianti fissi e mobili che fanno parte della catena del freddo, possono contribuire mediante una corretta progettazione, un'adeguata scelta dei componenti, una razionale gestione di esercizio all'ottimizzazione dei consumi energetici.

In tale contesto, le attività del presente obiettivo si sono articolate su due direttrici: lo sviluppo di un sensore elettronico capace di individuare il grado di deperibilità dei prodotti e, quindi, di ottimizzare le condizioni di esercizio, e l'individuazione di materiali di isolamento con migliori prestazioni.

Realizzazione di un sensore elettronico dedicato al controllo dello stato di conservazione di alimenti freschi conservati in ambienti critici

La prima fase di attività del presente obiettivo, realizzato da ENEA, è stato dedicato all'esecuzione di una serie di campagne preliminari di misura su diversi tipi di prodotti freschi disponibili nel corso dell'anno utilizzando un naso elettronico commerciale, il PEN3 della Airsense. Il risultato principale di queste campagne preliminari e dell'elaborazione delle misure con tecniche chemometriche, è stato la determinazione del numero minimo e del tipo di sensori sufficienti per discriminare le principali situazioni di interesse. E' stato quindi progettato e realizzato un sistema automatico di sampling che consente di monitorare lo spazio di testa di vari contenitori carichi con la frutta senza estrarli dalla cella frigorifero, di monitorare direttamente l'atmosfera della cella frigorifero carica di frutta. I primi passi per progettare, sviluppare e realizzare un naso elettronico a basso costo che possa monitorare direttamente nelle celle frigorifero usate per lo stoccaggio di ortofrutta, hanno richiesto l'individuazione di una piattaforma opportuna che consenta di sviluppare nel tempo un dispositivo con tutte le caratteristiche richieste dall'applicazione. E' stato acquistato quindi presso Libelium (uno spin-off universitario che progetta e costruisce sistemi wireless) l'hardware necessario per allestire un naso elettronico a basso costo. Utilizzando la piattaforma Libelium progettata con nodi comunicanti tra loro anche in modalità wireless si apre la possibilità futura di realizzare una rete di monitoraggio costituita da diversi nodi.

In generale, in una rete configurata secondo la soluzione realizzativa proposta da Libelium, ciascun nodo è costituito da una scheda elettronica di base dotata di microprocessore e di antenna e, dunque, capace di memorizzare ed elaborare dati e programmi e di effettuare trasmissioni programmate secondo una modalità definita che può essere il protocollo ZigBee. A questa base viene collegata una scheda di rilevazione ambientale secondo una modalità impilativa che rende il nodo, da un punto di vista strettamente fisico, una struttura relativamente compatta e di ingombro contenuto. Il nodo si configura quindi come un corpo articolato costituito da un'unità elaborativa e da una piattaforma di rilevazione.

Per reti wireless destinate a registrare la dinamica fisiologica dell'ortofrutta si utilizza una scheda di sensori di gas. Le schede Libelium, equipaggiate con la parte sensoristica, sono state impegnate in diverse prove di funzionamento. Si è cercato di verificare se le caratteristiche dei nodi Libelium, per altro entro una certa misura suscettibili di calibrazione o di adattamento, siano adeguate o comunque adeguabili alle esigenze operative del progetto. Si è cercato, per esempio, di saggiare in concreto l'affidabilità del processo di trasmissione in varie modalità di funzionamento oppure di trovare un compromesso operativo che consenta di rispondere in prima approssimazione al requisito di preriscaldamento che caratterizza in misura diversa tutti i sensori a stato solido impegnabili nella scheda Libelium. Per registrare il quadro olfattivo di un carico ortofrutticolo e seguirne la dinamica, sono stati scelti anche in base alle misure preliminari precedentemente effettuate con il PEN3, i sensori ritenuti più opportuni.

Per assicurare un adeguato campo escursivo a ciascun sensore sono state effettuate diverse prove che si sono dimostrate molto laboriose anche per la variabilità del contesto operativo e per l'incertezza della sua cinetica. Sono state configurate le schede dei gas con sei sensori (Figaro TGS 4161-Figaro SK25-Figaro 2600-E2v Mics 5521 - Figaro 2602-Figaro 2442) per valutare stabilità e sensibilità dei sensori in base alle modalità di preriscaldamento e di impostazione degli stessi. Le osservazioni, nel loro complesso, rendono necessario un approfondimento del problema del preriscaldamento dei sensori, che potrebbe essere responsabile di certi picchi poco plausibili che si

riscontrano in alcuni casi e di altri andamenti che sembrano essere attribuibili a derive, piuttosto che all'inseguimento della dinamica olfattiva.

In una delle modalità in cui si può configurare una rete, la ricezione dei dati ed il loro passaggio all'elaboratore è una funzione svolta dal Gateway. Il costruttore fornisce un ambiente di programmazione integrato che si limita alla visualizzazione dei dati in ricezione; non ne consente la conservazione, né di riversarli su qualche altra applicazione. Viste le nostre esigenze di trattamento dei dati, o anche più semplicemente di rappresentazione grafica delle rilevazioni numeriche, si è reso indispensabile progettare uno strumento di acquisizione e rappresentazione dei segnali con caratteristiche pensate per questa situazione. Sono stati sviluppati due programmi in ambiente LabView che permettono la lettura dei dati provenienti o dalle schede Libelium o salvati precedentemente sul disco rigido.

Una volta elaborati, i dati possono essere salvati in formato ASCII per essere fruibili da programmi di elaborazione dati (per es. excel) o salvati in un diverso file in formato testo che salva le stringhe originali Libelium. E' stato quindi sviluppato un software che legge le stringhe salvate su disco rigido dal precedente programma e le processa estraendo i dati dei sensori. E' possibile scegliere quale unità Libelium (MAC) processare tra quelle in elenco oppure inserire una nuova unità (Custom).

L'attrezzatura presente in laboratorio è composta da: una camera di test refrigerata e ventilata piccola dove sono state eseguite prove preliminari, una camera refrigerata grande da 4 m³, uno strumento di analisi on-line mod. PEN3 Airstense corredato di una serie di sensori a stato solido ad ossidi metallici e di un sistema di pattern recognition in grado di riconoscere odori semplici e complessi, una workstation HP per il controllo delle apparecchiature e per l'analisi dei dati.

La camera utilizzata per i test preliminari ha le seguenti caratteristiche:

- range di temperatura: -30°C +95°C
- umidità relativa: 10% 98% (+5°C +95°C)
- pareti in acciaio inox
- volume utile: 110 L (~0,1 m³)
- dimensioni interne 54x44x44 cm (LxHxP)
- possibilità di aspirazione in vuoto: ~100 mbar
- illuminazione interna.

I test preliminari in camera piccola da 0,1 m³ hanno portato alla definizione di procedure ottimali per le misurazioni da effettuare nella camera di test definitiva da 4 m³, le cui dimensioni nette sono 200x163x123cm, in scala 1:20 in volume rispetto ad un semirimorchio frigo reale delle dimensioni di 1333x244x255cm (~839 m³).

Lo strumento di analisi utilizzato è un naso elettronico commerciale professionale Airstense PEN3, dotato di 10 sensori MOS allo scopo di fornire la caratterizzazione di una emissione odorosa (VOC) nel periodo di interesse. Per effettuare misure direttamente in camera, su diversi punti o contenitori ad intervalli di tempo regolari oltre che a rendere le misure il più possibile esenti da errori accidentali e di ripetibilità, lo strumento PEN3 è stato accoppiato ad un sistema automatico di campionamento appositamente realizzato. Esso è formato da una scheda a microcontrollore programmabile via terminale seriale che gestisce l'apertura e chiusura di 7 elettrovalvole, la sincronizzazione dei tempi con il PEN3 ed un display per il controllo visivo dei tempi e dello stato del campionamento.

La tecnica di misura adottata è quella dello "spazio di testa statico" in cui il campione, chiuso in un contenitore pulito, è mantenuto ad una temperatura nota per un certo periodo di tempo in modo da permettere il raggiungimento dell'equilibrio tra i composti volatili emessi dal campione e quelli nella fase vapore. Il volume d'aria statica all'interno del contenitore è stato prelevato ed analizzato dal PEN3.

Sono stati analizzati alcuni tipi di frutta variando volumi e tempi di campionamento allo scopo di individuare i composti più importanti e significativi e rendere più oggettiva possibile una misura di odore (profilo aromatico), di classificarla e poterla riconoscere successivamente stabilendo così anche il punto di maturazione della frutta in esame.

Questi test hanno altresì permesso di stabilire il numero minimo e quali sensori utilizzare oltre a quelli di temperatura ed umidità nel sistema "naso elettronico" semplificato e dedicato da realizzare; quest'ultimo permetterà di trasformare gli attuali sistemi di refrigerazione da anello aperto, a sistemi autonomi ad anello chiuso (retroazionati) aumentandone così l'efficienza energetica, obiettivo finale del progetto.

L'allestimento della nuova cella refrigerata da 4 m³ con il sistema per la produzione controllata di ozono è stato completato nel settembre 2013, completando quindi l'allestimento del laboratorio che, in scala intermedia, permette di sviluppare e quindi testare l'array di sensori, oggetto finale del progetto di ricerca, in un ambiente che simula le caratteristiche e le problematiche principali dello stoccaggio di ortofrutta o generi alimentari deperibili.

I dettagli tecnici e le relative conclusioni sono ampiamente descritte nel rapporto RdS/2013/107.

Parallelamente è stato sviluppato dal Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma "Sapienza", uno studio che mira alla comprensione degli effetti di materiali avanzati, quali polimeri, complessi metallici ed ibridi a base di complessi di metalli di transizione, sulla maturazione post-raccolta della frutta. Infatti, questi materiali sono ottimi candidati nella prevenzione degli effetti etilene-indotti in una vasta gamma di frutti, attraverso l'assorbimento dell'etilene (C₂H₄).

L'obiettivo è stato finalizzato alla preparazione e caratterizzazione dei nuovi materiali da testare come assorbitori di etilene. Per le procedure sintetiche, i materiali sono stati preparati secondo metodologie recentemente messe a punto dal gruppo di ricerca. Tutti i materiali sono stati caratterizzati mediante spettroscopia FTIR, UV-vis ed NMR ed hanno mostrato tutti i segnali caratteristici. Una volta preparati, i materiali sono stati depositati, sotto forma di film, su substrati in vetro, preventivamente lavati mediante immersione in solventi e ricoperti per casting per un'area sensibile di 1 cm². Sono stati quindi realizzati dei sistemi chiusi in cui la frutta climaterica, nel caso specifico banane, potesse sviluppare l'etilene e vi sono stati posti all'interno i film dei vari materiali per valutare e confrontare la loro capacità di assorbimento dell'etilene direttamente nel corso della maturazione della frutta. Sono state poi condotte una serie di prove sperimentali a temperatura ed umidità ambiente.

I dettagli tecnici e le relative conclusioni sono ampiamente descritte nel RdS/2013/106.

Individuazione delle caratteristiche costruttive ottimali di strutture multistrato contenenti Materiali a Cambiamento di Fase per la realizzazione di celle frigorifere

L'attività punta all'individuazione e alla caratterizzazione in condizioni simulanti l'esercizio di strutture multistrato presenti sul mercato contenenti tipologie diverse di materiali a cambiamento di fase potenzialmente utilizzabili nella costruzione di pareti multistrato di celle frigorifere, al fine della definizione delle caratteristiche costruttive ottimali per la applicazione specifica.

I pannelli MISA non modificati, sono costituiti da un sandwich di materiale isolante in schiuma poliuretanicca da 6 cm inserito tra due lamiere di acciaio inox AISI 304 6/10.

Al fine di migliorare le caratteristiche isolanti, uno dei due pannelli è stato modificato mediante l'applicazione di uno strato di un PCM di tipo paraffinico dello spessore di 2 cm, denominato "Rubitherm RT 35" (Tabella 81), contenuto all'interno di un involucro di alluminio a tenuta stagna.

Tabella 81. Rubitherm RT 35

Intervallo di fusione	29-36 °C
Intervallo di solidificazione	36-31° C
Capacità di accumulo termico	170 kJ/kg

Le prove di caratterizzazione vibrazionali sono state eseguite, su un pannello "tal quale" (Figura 384a) e supannello modificato con PCM (Figura 384b), su una tavola vibrante di dimensione 2 m x 2 m le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 82.



a) Pannello Tal Quale e particolare della sezione

b) Pannello con PCM e particolare della sezione

Figura 384. Pannello tal quale e con PCM. Allestimento prove di caratterizzazione

Tabella 82. Caratteristiche della tavola vibrante

Dimensioni	2 m x 2 m
Gradi di libertà	6 DOF
Range di Frequenza	0-100 Hz
Accelerazione	5 g peak
Velocità	1 m/s (0-peak)
Spostamento	0,30 m (0-peak)
Massa ed altezza del baricentro dell'oggetto in prova	1 [t] 1 m altezza baricentrica

I test su tavola vibrante sono stati eseguiti sul pannello "tal quale" e su quello modificato con l'applicazione dello strato di PCM. Al fine di simulare l'impiego dei pannelli sulle pareti laterali e sul tetto delle celle frigorifere sono state previste prove sul pannello posto sia in posizione verticale che orizzontale.

Inoltre, per evidenziare gli effetti delle prove dinamiche vibrazionali sulla struttura del pannello modificato, i test su tavola vibrante sono stati preceduti e susseguiti da prove non distruttive di tipo ultrasonico, volte ad evidenziare le eventuali disomogeneità dei pannelli stessi (compattezza strutturale, delaminazione, presenza di vuoti ed eventuali cambiamenti di fase, ecc.) dovuti all'esposizione a vibrazioni per un trasporto su strada equivalente in circa 1000 miglia.

I risultati di questi test sono propedeutici per la verifica dell'effetto delle vibrazioni sia sul comportamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. sali fusi) nella configurazione di posizionamento sul tetto e/o sulle pareti laterali della cella frigorifera sia per la verifica della criticità relative da una parte, ai sistemi di contenimento dei PCM (rigidi o flessibili) e dall'altra, alle tecniche di incollaggio/giunzione tra le pareti del pannello sandwich ed il contenitore/i dei PCM.

Il confronto dei risultati ottenuti sul pannello modificato con l'applicazione dei PCM per quanto concerne le prove ultrasonore su tavola vibrante sono riportati in Tabella 83.

Tabella 83. Prove ultrasonore pre/post test su tavola vibrante

	Pannello MISA		Pannello Misa + PCM		Involucro con PCM
	prima	dopo	prima	dopo	
Velocità sonora media m/s	671	670	228	222	773
Deviazione standard m/s	24	9	203	206	26
Stato nei 6 punti di misura	Omogeneo, uniforme Velocità Bassa	Omogeneo, uniforme Velocità inalterata	Disomogeneo variabile Velocità Molto Bassa	Disomogeneo variabile Velocità inalterata	Omogeneo, uniforme Velocità Bassa

Le misure ultrasoniche effettuate sul pannello "tal quale" non hanno messo in evidenza alcuna variazione strutturale del pannello stesso prima e dopo il test su tavola vibrante: le velocità trasmesse nei diversi punti sono risultate omogenee fra loro e confrontabili. Al contrario le misure effettuate sul pannello rivestito con PCM sono risultate molto disomogenee fra loro. Ciò si è ritenuto in prima analisi imputabile al fatto che il sistema di incollaggio tra le due parti (pannello e contenitore PCM) sia risultato poco efficace.

Le misure ultrasoniche hanno inoltre evidenziato che lo strato di PCM di tipo paraffinico "Rubitherm RT 35" presente all'interno dell'involucro di alluminio risulta essere uniformemente distribuito.

Le sperimentazioni effettuate in questa prima fase delle attività progettuali hanno evidenziato, in relazione alla possibile applicazione in sistemi frigoriferi autotrasportati, la criticità dei sistemi di giunzione tra il pannello frigorifero ed il sistema di contenimento dei PCM. Infatti a conclusione dei test su tavola vibrante il contenitore dei PCM risultava essersi distaccato dal pannello (Figura 385). Bisognerà quindi

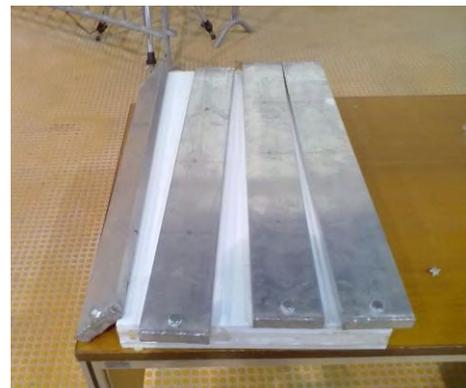


Figura 385. Pannello con PCM dopo il test su tavola

prevedere sistemi di giunzione in grado di garantire un'adesione più efficace anche in condizioni critiche di esercizio.

I dettagli tecnici e le relative conclusioni sono ampiamente descritte nel rapporto RdS/2013/102.

Analisi delle performance dei PCM al caso in esame

Allo scopo di verificare il raggiungimento di benefici di risparmio energetico derivante dall'uso di materiali in passaggio di fase, PCM nell'involucro delle celle frigorifere sono state condotte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche, delle analisi preliminari così articolate:

- a) analisi teorica basata su una approfondita ricerca bibliografica per la individuazione delle tecnologie utili per lo sviluppo dell'indagine scientifica;
- b) scelta di un modello di cella frigorifera e simulazione numerica del comportamento termico della stessa;
- c) analisi sperimentale per il confronto di sistemi refrigerati di identica costruzione, di cui uno dotato di materiale in passaggio di fase.

I risultati di queste attività hanno permesso di verificare la fattibilità dell'uso dei PCM in condizioni critiche e di sviluppare tecniche costruttive appropriate per raggiungere gli obiettivi fissati.

Sono state eseguite simulazioni con 1, 2 e 3 cm di paraffina (PCM) e 1 e 2 cm di sale di Glauber (PCM) sotto diverse condizioni climatiche caratteristiche delle tre ipotetiche fasce geografiche dell'Italia: Nord, Centro e Sud, identificate con i parametri climatici (temperature dell'aria, Irraggiamento solare)delle città di: Milano, Ancona; Palermo. I risultati delle simulazioni sono stati la valutazione delle temperature superficiali interne ed esterne e dei flussi termici entranti nel pannello sottoposto agli input climatici relativi ai seguenti orientamenti: Verticale Nord, Sud, Est Ovest ed Orizzontale. L'evoluzione del flusso termico viene valutata nel periodo di un giorno (on una scansione in secondi) ed elaborata in grafici.

La fase sperimentale è stata imperniata sulla evidenziazione del contributo del PCM al risparmio energetico nell'esercizio di celle frigorifere esposte ai carichi termici ambientali esterni. Per perseguire questo obiettivo, sono state acquisite due celle frigorifere identiche delle quali una è stata implementata sulla superficie esterna orizzontale di copertura con uno strato di materiale in passaggio di fase. Le due celle, successivamente alla messa a punto, sono state poste all'esterno per simulare le condizioni nelle quali operano le celle frigorifere poste a bordo di mezzi di trasporto. Le due celle sono state dotate di un sistema di monitoraggio dei parametri termici caratterizzanti il comportamento termodinamico delle stesse, mentre il rilievo dei parametri ambientali esterni è stato effettuato attraverso l'uso di una centralina climatica. Il confronto tra le prestazioni energetiche delle due celle, sottoposte alle stesse condizioni ambientali esterne ha portato ad evidenziare il diverso comportamento, con il conseguente diverso consumo energetico.

Nel capitolo successivo viene riportata una descrizione più estesa dei risultati delle attività svolte da DIISM, mentre la completa e approfondita discussione delle attività e dei risultati è contenuta nel RdS/2013/101.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nel presente capitolo vengono descritte brevemente le attività, e i relativi risultati, svolte dai soggetti esterni che hanno collaborato con ENEA.

a. Reti di poligenerazione distribuita

Università degli Studi di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE)

L'obiettivo delle attività è stato la definizione ed implementazione di una piattaforma integrata per il monitoraggio e l'elaborazione in tempo reale dei sistemi di poligenerazione a servizio di una rete termica ed elettrica locale.

La scalabilità del sistema informatico sviluppato ne consente l'applicabilità in reti energetiche locali facilmente implementabili nel software di simulazione di ENEA. Il monitoraggio da remoto delle reti individuate come test case ha consentito di validare i risultati di simulazione ottenuti dai modelli sviluppati da ENEA. Viste le attività di ricerca in corso all'interno del Piano triennale 2012-2014, sono stati individuati le reti caratterizzate da sistemi di generazione distribuita utilizzabili come primi casi test. Ciò al fine di applicare la piattaforma di monitoraggio sviluppata e validare il nuovo simulatore di ENEA attraverso:

- la rete termica ed elettrica del Centro Ricerche Casaccia;

- la rete termica ed elettrica del quartiere Arquata di Torino, studiata all'interno del presente Progetto dal Politecnico di Torino.

Sviluppo della piattaforma, acquisizioni e relative analisi

Nell'ambito della poligenerazione si devono monitorare alcune grandezze che descrivono lo stato del sistema, quali:

- *Misure termiche*: Portata del fluido termovettore; temperatura del fluido termovettore; temperatura ambiente; potenza termica; energia termica;
- *Misure Elettriche*: tensione; corrente; frequenza; potenza elettrica; energia elettrica; THD.

La piattaforma di acquisizione è stata sviluppata in Labview, della National Instruments, per la sua dinamicità e per la sua immediatezza nell'interfaccia grafica di processi e automazioni industriali. Il programma implementato in Labview è configurabile ed offre un'alta scalabilità dovuta alla possibilità di utilizzare i seguenti parametri:

- Il numero dei dispositivi da interrogare in remoto attraverso modbus su TCP/IP
- Gli indirizzi IP e gli indirizzi Modbus dei singoli dispositivi
- Il registro Modbus interno di partenza da cui leggere ed il numero di byte da leggere.

Tali parametri sono letti da un database esterno il quale fornisce anche il numero totale di dispositivi presenti nella rete di poligenerazione. Per l'inserimento dei dati di tale database sviluppato in Microsoft Access, è stata sviluppata un'interfaccia grafica che permette la gestione sia del tipo di dispositivi sia dell'intero progetto. Una volta inserite le informazioni attraverso le apposite maschere di gestione che sono state create, il programma implementato in Labview, leggerà l'elenco e le caratteristiche dei dispositivi presenti nel database ed interrogherà tali dispositivi per acquisire le informazioni richieste. Nel programma ci sono due processi iterativi in parallelo che interrogano i dispositivi di monitoraggio sia della rete termica che elettrica rispettivamente e memorizzano tali dati su file di testo, inserendone anche il timestamp (informazioni relativi al momento dell'acquisizione del dato), per una successiva analisi o post elaborazione.

Attraverso il pannello frontale sviluppato in Labview è possibile visualizzare, in real time, i valori acquisiti. Il tempo di campionamento per i dispositivi interrogati è in media di un campione al secondo. Tale risoluzione trova utilità nell'ambito della gestione delle rete di poligenerazione formate da fonti rinnovabili ad alta aleatorietà. Ricapitolando, attraverso il portale sviluppato, è possibile configurare una serie di dispositivi costruiti da entità diverse, inserendo sia i dati specifici sia gli indirizzi IP degli apparati di misura nel database. Dopodiché tali dispositivi saranno interrogati attraverso Modbus su TCP/IP, memorizzando i dati della rete di poligenerazione.

Al fine di poter utilizzare tale piattaforma di monitoraggio anche per il controllo e la gestione dei flussi di potenza all'interno delle rete di poligenerazione, sono stati implementati funzionalità aggiuntive che utilizzano i dati acquisiti in real time. In particolare è stato implementato un sistema di controllo, di un energy storage, capace di gestire la potenza attiva e reattiva scambiata con la rete in base alle misure effettuate sulla rete stessa. Lo schema di connessione e lo schema interno del compensatore sono mostrati in Figura 386.

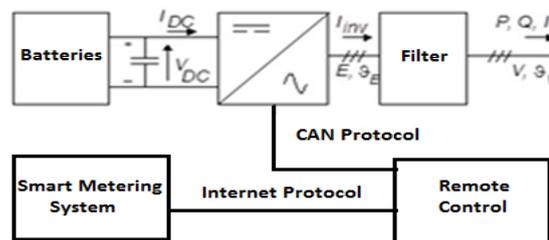


Figura 386. Schema a blocchi e dei dispositivi del compensatore statico

Il sistema di controllo implementato, acquisendo le grandezze elettriche fondamentali dalla rete, attraverso richieste modbus su TCP/IP, elabora i dati ed invia la decisione all'energy storage attraverso il protocollo e l'interfaccia CAN presente e configurata a 250 kBit/s. Il pannello frontale è mostrato in Figura 387. La risoluzione temporale di tale sistema comporta l'acquisizione, l'analisi e l'invio dei dati una volta al secondo. Ciò è stato possibile attraverso: la definizione dell'interfaccia di gestione del compensatore utilizzando il protocollo CAN tramite hardware PEAK USB-CAN; sviluppando un software di controllo attraverso Labview che gestisce il compensatore statico in modo da regolare la potenza attiva e reattiva scambiata con la rete; interfacciando quest'ultimo con il sistema di monitoraggio per l'implementazione e lo sviluppo di logiche di controllo di gestione dell'energy storage system.

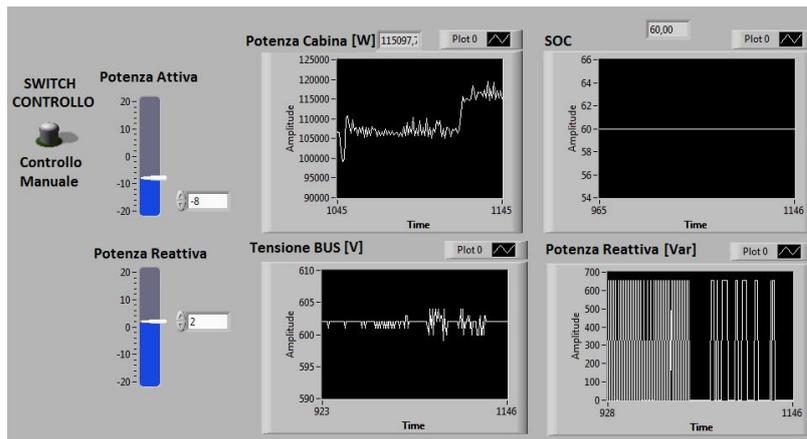


Figura 387. Interfaccia utente per il monitoraggio e la gestione dei sistemi energetici

Attraverso tale sistema è stato possibile implementare logiche di controllo tramite i dati del sistema di monitoraggio. Come esempio applicativo, è stata sviluppata una logica che ha visto l'attuazione del Peak Shaving. Tale logica prevede l'acquisizione della potenza da parte del sistema di smart metering e la decisione della potenza che l'Energy Storage System deve erogare o meno al fine di non superare un certo valore di potenza assorbita un determinato punto della rete.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/103.

Università di Palermo, Dipartimento Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli matematici

La piattaforma integrata che è stata definita in questo lavoro modella una infrastruttura integrata di controllo ed i due sistemi controllati.

Come è noto le MicroGrid (MG) sono dotate di sistemi di generazione, da fonte rinnovabile o non, sistemi di accumulo, carichi, controllabili o non controllabili. Al fine di implementare strategie semplici e facilmente realizzabili nella piattaforma integrata, si è ritenuto di potere agire sullo stato dei sistemi di accumulo, controllando il sistema di interfaccia e dei carichi delle utenze residenziali appartenenti al distretto. Inoltre, si è assunto che il cogeneratore presente funzioni ad inseguimento termico.

Controllo dei sistemi di accumulo

Il controllo dei sistemi di accumulo presenti nel sotto sistema elettrico simulato è stato eseguito cercando di inseguire obiettivi di tipo tecnico/economico. Non potendo disporre di algoritmi di ottimizzazione multi-obiettivo, troppo dispendiosi dal punto di vista dei tempi di calcolo in una piattaforma che sviluppa simulazioni annuali con una risoluzione di 15 min, si è preferito mettere a punto una strategia di controllo del sistema di accumulo che inseguisse un profilo desiderato, compatibilmente con la massimizzazione del risparmio economico conseguente all'acquisto di energia nelle ore in cui la stessa energia venisse valorizzata ad un valore di PUN (Prezzo Unico Nazionale) inferiore la valore medio previsto per le 24 ore successive. La strategia si basa sull'idea innovativa di trasformare il problema di scheduling in un problema di fitting della grandezza da controllare con una funzione analitica che abbia le caratteristiche più adeguate a rappresentare il comportamento desiderato.

Gli elementi economici si concretizzano nella identificazione degli intervalli di tempo nei quali è opportuno rilasciare energia (Prezzo dell'energia elevato) ed a quelli nei quali è opportuno assorbita (Prezzo dell'energia basso). La nozione di elevato e basso attribuita al prezzo dell'energia è stata numericamente valutata semplicemente confrontando il valore previsto del PUN con il suo valore medio previsto nelle successive 24 ore. Gli elementi di carattere tecnico invece si concretizzano nella identificazione di intervalli di tempo ed ampiezze della potenza scambiata con la rete al fine di rendere il diagramma di carico complessivo quanto più possibile fedele a quello richiesto dal distributore (che potrebbe anche essere un diagramma piatto). La strategia di dispacciamento ottimizzato proposta, quindi, esegue un fitting pesato, utilizzando per la rappresentazione del profilo di assorbimento/rilascio di potenza da parte del sistema di accumulo elettrico una funzione analitica interpolante ad integrale nullo nelle 24 ore.

I pesi saranno più elevati quando conviene economicamente che la funzione interpolante segua il profilo tecnicamente desiderato, mentre saranno più contenuti quando tale condizione non è più conveniente dal punto di vista economico. In tal modo è possibile, in modo semplice e rapido, risalire ad un profilo di assorbimento/

rilascio di potenza da parte del sistema di accumulo che consente, per quanto possibile, di acquistare energia nelle ore in cui il PUN è minore del valore medio previsto per l'intervallo di riferimento e di seguire il comportamento tecnicamente desiderato, ossia di restituire in combinazione con la generazione di energia da fonti non controllabili e da carichi non controllabili, un profilo desiderato.

Sono stati analizzati tre scenari che mettono in evidenza i risultati relativi ad una gestione centralizzata o decentralizzata delle risorse, in assenza ed in presenza di politiche di demand response cui i carichi potrebbero rispondere.

La rete su cui si eseguono le simulazioni ha una dimensione ridotta e comprende tre grossi edifici con diversa destinazione d'uso. L'inserimento del sistema di accumulo controllato con la logica descritta consente di ottenere un appiattimento del diagramma di carico visto dal distributore, offrendo al contempo un utile economico per il gestore della microrete.

L'interfaccia della piattaforma integrata

Lo strumento di sviluppo adottato per la realizzazione del software, risultato delle attività, è l'IDE (Integrated Developer Environment) NetBeans 7.1.2, il quale fornisce un ambiente specifico per la creazione di interfacce grafiche.

Da un punto di vista funzionale, il sottosistema di interfaccia può essere assimilato ad un sistema CAD-like per la caratterizzazione della topologia delle varie componenti della rete di un distretto energetico. Ciascun elemento inserito può essere parametrizzato assegnando dei valori alle grandezze principali che lo definiscono, le quali variano in funzione della tipologia dell'elemento stesso.

Il modello può essere analizzato e descritto in base a due viste principali:

- il layer termico: nel quale vengono definiti tutti gli elementi che hanno una o più componenti che entrano in gioco nella simulazione per quanto riguarda il comportamento del distretto energetico dal punto di vista termico. Ogni elemento istanziabile sull'interfaccia del layer termico (tubazione, generatori, utenze, ecc.) presenta un set di grandezze caratterizzabile tramite specifica interfaccia grafica descritta e implementata da ENEA in questa annualità;
- il layer elettrico: nel quale vengono definiti tutti gli elementi che hanno una o più componenti che entrano in gioco nella simulazione per quanto riguarda il comportamento del distretto energetico dal punto di vista elettrico.

Le due viste che sono sostanzialmente differenti, presentano però delle sovrapposizioni parziali, in quanto un elemento può avere sia una caratterizzazione termica che elettrica. Nella Figura 388 è rappresentata una vista del layout termico nella finestra principale dell'interfaccia.

Alla stregua della parte termica, anche la parte elettrica può essere definita in termini di nodi e loro interconnessioni. La topologia adottata in questo caso non è la dorsale, bensì quella di grafo connesso aciclico, ovvero un albero. Questa struttura è rappresentata a un nodo di saldo che funge da radice, al quale vengono connessi altri nodi di generazione, di carico e di giunzione. Un esempio di topologia di rete elettrica è mostrata in Figura 389. I nodi di generazione e di carico possono essere supportati da componenti ausiliari, quali pannelli fotovoltaici e sistemi di accumulo elettrico. Ogni elemento istanziabile sull'interfaccia della piattaforma integrata sul layer elettrico o termico dispone di un set di grandezze specifico che parametrizza il componente stesso ai fini della simulazione.

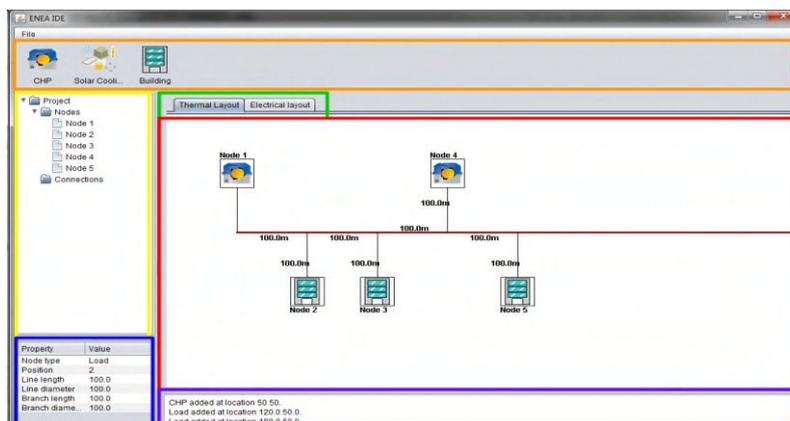


Figura 388. Finestra principale del sistema di interfaccia

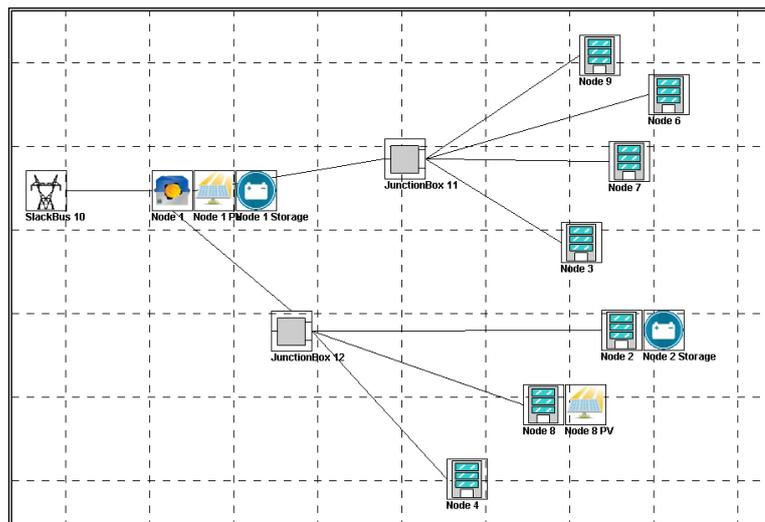


Figura 389. Esempio di topologia di rete elettrica con nodo di saldo, 2 nodi di generazione, 7 nodi di carico e 2 di giunzione. Nella topologia sono presenti anche dei componenti ausiliari quali pannelli fotovoltaici e sistemi di accumulo elettrico

Il risultato delle attività di ricerca consiste nella messa a punto di interfaccia e di alcune funzionalità dei componenti della piattaforma integrata che modella il comportamento elettrico e termico di un distretto energetico. Tale comportamento è stato simulato su una intera annualità, consentendo l'aggiornamento dei parametri di funzionamento costanti ogni 15 min. Gli screenshot della piattaforma mostrano la semplicità nell'utilizzo anche da un utente non esperto. Le uscite del simulatore del layer elettrico forniscono: perdite per effetto Joule e cadute di tensione a tutti i nodi della rete. Le simulazioni riportate per gli scenari selezionati mettono in evidenza il comportamento ottimizzato delle risorse energetiche per conseguire i risultati tecnico-economici attesi. La gestione ottimizzata delle risorse è stata implementata considerando che i tempi di calcolo fossero contenuti utilizzando una visione innovativa dei problemi di dispacciamento.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/104.

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia (DENERG)

Oggetto della collaborazione è stato l'approfondimento delle tematiche inerenti le reti termiche di teleriscaldamento, con focus sulle reti locali, analizzando i principali problemi tecnici, normativi ed economici caratteristici di tali tecnologie. Il fine di tali analisi può essere individuato nel tentativo di individuare soluzioni progettuali da proporre sia a strutture esistenti, sia a nuove installazioni, per rendere più efficienti le attuali infrastrutture.

L'ultima parte dell'attività è stata focalizzata nell'analisi di un modello di simulazione di reti termiche, sviluppato su piattaforma Matlab Simulink dall'ENEA in collaborazione con l'Università "Sapienza" di Roma (Rapporto RdS/2012/078 e RdS/2012/079). Sono stati implementati i necessari sviluppi software, volti a rendere il modello adatto a simulare la rete di quartiere analizzata in seno al presente studio. Tale attività ha consentito di arrivare ad una prima validazione del programma, basata sui dati di funzionamento reale dell'impianto ivi considerato. Nello specifico, è stato analizzato nel dettaglio un impianto di cogenerazione localizzato a Torino asservito ad una rete di teleriscaldamento per la distribuzione dell'energia termica agli stabili residenziali del quartiere limitrofo (Figura 390). L'impianto vede inoltre la presenza di un assorbitore a bromuro di litio, per produrre energia frigorifera durante i mesi estivi, in assetto trigenerativo. Le indagini svolte hanno permesso inizialmente di determinare i parametri caratteristici di funzionamento dell'impianto, quali gli indici di performance energetica; sulla base di questi sono state individuate le attuali inefficienze di gestione, sia lato produzione, che lato distribuzione del calore. Si sono successivamente valutate le possibili ottimizzazioni nella conduzione dell'impianto, quali ad esempio la definizione di nuove strategie di controllo del cogeneratore, in grado di ridurre le perdite. Le soluzioni migliorative ipotizzate sono state corredate da un'analisi economica, in modo da valutare anche l'effettiva fattibilità economica delle soluzioni ipotizzate.

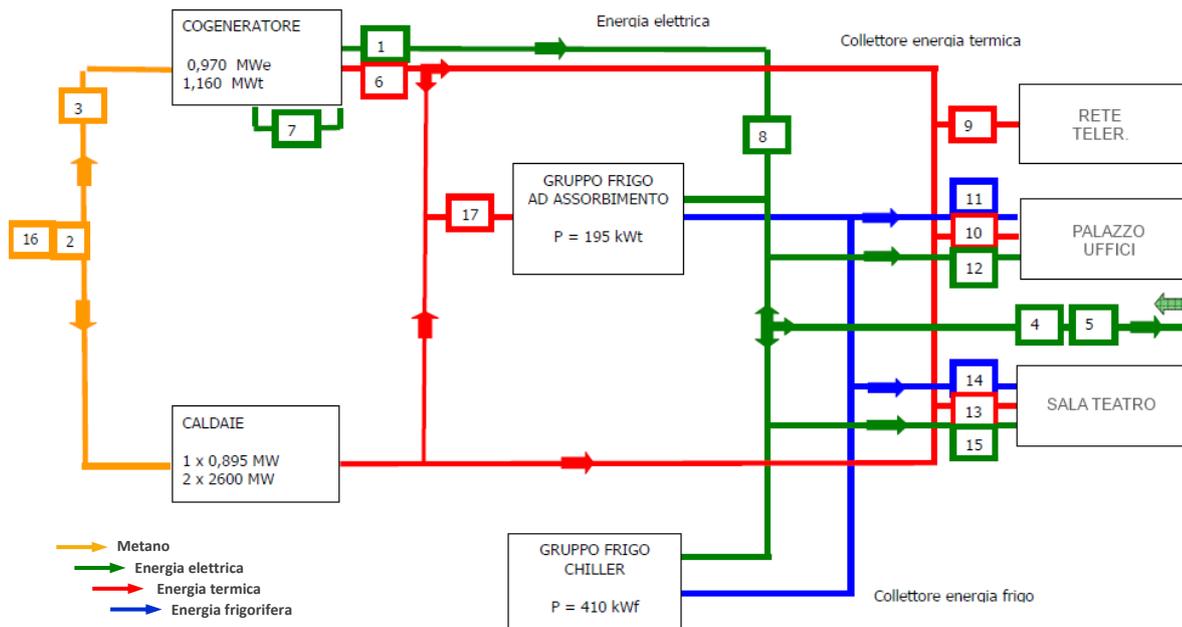


Figura 390. Schema della centrale termica

La rete di teleriscaldamento è caratterizzata da circa 2 km doppia tubazione, mandata e ritorno, e trasporta l'acqua calda prodotta in centrale ai 31 edifici residenziali di cui si compone il quartiere. E' inoltre presente un contatore di energia termica presso ogni edificio residenziale per la contabilizzazione dell'energia ceduta dalla rete all'edificio. In funzione delle regole di esercizio si sono ricavate le produzioni mensili di energia elettrica e termica dell'impianto che sono state poi confrontate con i valori reali rilevati ai misuratori installati.

Definizione degli indici di performance dell'impianto

Le prime analisi condotte sulle prestazioni del cogeneratore hanno messo in evidenza alcune inefficienze legate alla produzione termica, soprattutto durante i mesi estivi. Infatti, in tali mesi, a causa del limitato utilizzo del calore prodotto, l'indice PES (Primary Energy Saving) diventa negativo.

Tenendo conto dei profili di richiesta giornaliera dei diversi mesi si sono prese in esame diverse configurazioni alternative di esercizio del cogeneratore, che prevedono una riduzione dell'energia termica dispersa nella stagione estiva:

- *Configurazione 1*: modalità di esercizio attuale;
- *Configurazione 2*: si è ipotizzato di ridurre il livello di carico del cogeneratore nei mesi da maggio a settembre al 65%, e di mantenere la programmazione attuale da ottobre ad aprile;
- *Configurazione 3*: si è previsto di variare l'esercizio del cogeneratore rispetto alla configurazione attuale solo nei mesi di maggio e settembre, imponendo un funzionamento a carico ridotto del 65% come nel caso precedente. Si è pensato, inoltre, di inserire un nuovo gruppo frigorifero ad assorbimento in sostituzione del gruppo a compressione, al fine di poter soddisfare la richiesta frigorifera delle utenze con il solo uso dell'energia.

Gli indici energetici nelle nuove configurazioni di esercizio sono risultati superiori a quelli della configurazione attuale dell'impianto. I valori riportati sono le medie dei valori mensili calcolati per l'anno 2012. L'analisi energetica è stata corredata da un'analisi economica, condotta per lo stesso anno per validare la sostenibilità delle soluzioni ipotizzate.

Simulazione degli scenari di gestione in ambiente MATLAB-Simulink

Le configurazioni individuate sono state poi provate sulla piattaforma di simulazione che ENEA sta sviluppando al fine di una sua validazione. I risultati ottenuti hanno evidenziato le problematiche reali legati alla gestione e conduzione di impianti di cogenerazione connessi a reti di teleriscaldamento, e hanno consentito di definire e proporre soluzioni di miglioramento dell'efficienza del sistema complessivo. Le nuove configurazioni di esercizio consentono di ottenere valori di PES annuali più elevati (+19% su base media annua), con benefici economici non trascurabili (aumento dei margini di esercizio fino a +27 k€ all'anno).

Gli sviluppi operati sul simulatore hanno portato ad ottenere perdite termiche della rete coerenti con altri studi effettuati sullo stesso impianto, oltre che con i valori sperimentali disponibili. Si è così ottenuta una prima validazione di tale modello di rete termica.

Si è individuata, infine, l'opportunità di estendere tali sviluppi per arrivare ad un modello integrato, capace di simulare l'intero sistema di generazione, accumulo, distribuzione e utilizzo del calore, tarato sui valori reali di produzione e di richiesta termica della rete locale analizzata in seno a tale studio.

Alla luce delle evidenze emerse dallo studio, di particolare interesse potrebbe essere inoltre l'allestimento di un sistema di monitoraggio remoto dell'intero impianto, con il quale poter valutare in real-time le prestazioni energetiche dei principali componenti dello stesso, e definire, conseguentemente, nuove strategie di controllo in grado di ridurre le perdite e aumentare la capacità di fornitura delle reti esistenti.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/105.

Seconda Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Seconda Università di Napoli riguardano lo sviluppo di metodologie di misura avanzate per reti di distribuzione asservite all'alimentazione di reti integrate di servizi per distretti energetici e la definizione delle specifiche dell'architettura di "concentratori dati intelligenti" che consentono l'interazione tra generazione e utilizzazione e prevedono accesso da remoto e pubblicazione dati. Il principale risultato dell'attività in oggetto consiste nella realizzazione di un prototipo che consente l'utilizzo delle diverse metriche di misura esistenti per il regime non sinusoidale in maniera selezionabile in base agli eventuali differenti accordi commerciali.

Prototipo di un contatore intelligente con metriche di misura avanzate

È stato realizzato e testato sperimentalmente un prototipo di misuratore di energia elettrica in grado di effettuare le misurazioni con le principali metriche riportate nella letteratura scientifica internazionale, sia in ambito domestico sia industriale. In maniera contestuale alle misure per la tariffazione saranno analizzati i principali indici di power quality, in maniera tale da poter associare alla quantità di energia tariffata anche un indice di livello qualitativo di fornitura che eventualmente può essere oggetto di variazione tariffaria concordata contrattualmente (Custom Power). Per applicare utilmente le tecniche definite in questa prima fase, ai reali segnali elettrici dei sistemi elettrici di potenza, è stato necessario progettare e realizzare specifici i trasduttori di corrente, tensione con tecnologia più idonea per la misura di potenza ed il rilievo dei parametri che determinano la qualità dell'alimentazione. A tale scopo sono state considerate alcune specifiche di progetto notevoli, quali la corrente massima misurata, che dovrà includere possibili elevati spike di corrente, la larghezza di banda, che dovrà garantire misure a frequenze dell'ordine di qualche kHz, unitamente ad un target di basso costo presunto del dispositivo complessivo. È stata inoltre sviluppata un'interfaccia di comunicazione per la trasmissione dei dati raccolti ad un nodo concentratore, sviluppato nella fase successiva, che consenta la gestione integrata dei flussi di energia nell'ambito del paradigma delle smart grid.

Implementazione hardware

Per la trasduzione dei segnali elettrici di tensione e corrente si è progettato una sezione di trasduzione in grado di alimentarsi dal segnale in ingresso, ed è stata realizzata in logica operativa. I trasduttori sono stati progettati in modo che con un segnale sinusoidale di ingresso pari al valore di progetto (460 Vrms per quello di tensione e 30 Arms per quello di corrente) si abbia per entrambi in uscita una tensione sinusoidale pari a 1,5 V (valore di picco) e una componente continua pari a 1,5V. Per la tensione si è utilizzato un valore di sovraccarico 2 per tenere conto di eventuali sovratensioni.

L'architettura del sistema di misura implementato ha lo schema a blocchi riportato in Figura 391. La parte relativa all'acquisizione, interfacciamento con le periferiche di comunicazione è implementata all'interno di un unico microcontrollore della famiglia dei ARM Cortex-M4: il STM32F4XXX. In figura viene riportata un'immagine del prototipo del misuratore implementato.

Implementazione Firmware

Il firmware è stato sviluppato nell'ambiente di programmazione keil μ Vision, 4.04. Tale ambiente di programmazione ha permesso di sviluppare il firmware dell'STM32F407VGTB in codice C. Mediante keil μ Vision, 4.04. e grazie al debugger integrato nella scheda di sviluppo STM32F4 è stato poi possibile effettuare un lavoro di debugging del sistema in modo tale da poter trovare e correggere le eventuali anomalie o malfunzionamenti del sistema.

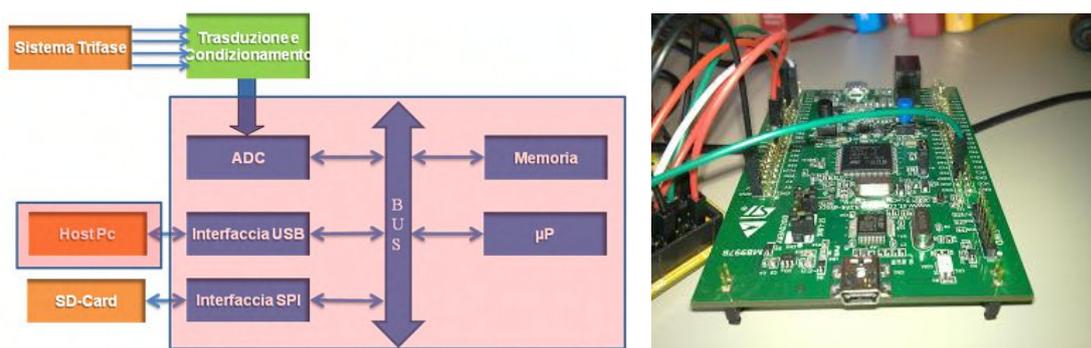


Figura 391. Schema a blocchi del misuratore implementato e immagine del prototipo

Prototipo di un'unità intelligente di concentratore dati

Obiettivo di questa fase è stata la definizione delle specifiche dell'architettura di "concentratori dati intelligenti" e la realizzazione dell'unità di raccolta e pubblicazione dei risultati di misura dell'energia elettrica provenienti dai dispositivi di campo. È stato condotto uno studio mirato a sviluppare algoritmi di elaborazione dei dati orientati al data fusion, con l'obiettivo di realizzare un sistema di elaborazione di dati, costituito da un set di algoritmi di processing e una infrastruttura per l'acquisizione e archiviazione dei dati, a supporto degli utenti e gestori che si occupano di pianificazione, monitoraggio e gestione integrata dell'energia elettrica. Il contatore di energia realizzato nella fase precedente è essenzialmente un sistema embedded in grado di acquisire i segnali provenienti dai sistemi di sensing, integrarli in un'unica informazione "consumo di energia", provvedere al conteggio per la fatturazione ed eventualmente trasmettere l'informazione al nodo concentratore. Quest'ultimo è costituito essenzialmente da un altro sistema embedded di livello superiore dotato di una memoria locale per l'immagazzinamento dei dati ed un'unità di comunicazione, wired e/o wireless, per l'interazione con i dispositivi di campo dello stesso sito o con un nodo concentratore ad un livello immediatamente superiore o la pubblicazione in rete. In una prima fase si sono analizzate le possibili soluzioni architettoniche per la realizzazione del concentratore approfondendo gli aspetti cruciali relativi ai protocolli di comunicazione che garantiscono da un lato l'efficienza e semplicità comunicativa, e dall'altra la massima interoperabilità anche tra dispositivi di differente tipologia. Nello sviluppo del nodo concentratore è stato opportunamente analizzato uno dei principali problemi delle infrastrutture di rete, e cioè la robustezza e la sicurezza dei dati e delle comunicazioni informatiche (cyber security) per la loro diffusione. A tale scopo sono state analizzate l'insieme delle misure tese ad assicurare a ciascun utente autorizzato, tutti e soli i servizi previsti per quell'utente, nei tempi e nelle modalità previste orientandosi all'approccio principio "a minimo rischio" (o del minimo costo). L'approccio a "zero risk" in quest'ambito è inutile, in quanto implica un costo di progettazione, sviluppo e testing decisamente maggiore del costo, inteso come perdita di profitto o di immagine, che si avrebbe nel caso di intrusione o manipolazione del sistema. Seguendo tale approccio si è perseguito il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- **Confidenzialità:** proprietà per cui l'informazione non è resa disponibile a soggetti non autorizzati. Se un soggetto non autorizzato entra in possesso del messaggio che veicola l'informazione, quest'ultima è per lui non intellegibile. **Integrità:** proprietà di inalterabilità dell'informazione.
- **Autenticazione:** verifica dell'identità dichiarata da un soggetto. Un ricevente è sicuro sull'identità del soggetto mittente e viceversa un mittente è sicuro sull'identità del soggetto destinatario.
- **Autorizzazione:** determinare se ad un soggetto, che richiede dati e/o servizi, è permesso il diritto a fare quella richiesta. In generale ad ogni soggetto sono concessi dei diritti, ad ogni risorsa sono associate delle liste di diritti (ACL, Access Control List). Una ACL è una lista dei soggetti autorizzati, in cui per ognuno sono specificati i rispettivi diritti.
- **Non ripudio:** proprietà per cui il destinatario di una comunicazione può provare che il mittente effettivamente abbia effettuato la comunicazione, anche se quest'ultimo successivamente volesse negare di averla mai effettuata.
- **Auditing:** l'azione di registrare, in modo permanente e non modificabile, tutte le richieste e le risposte effettuate dai soggetti al sistema o tra di loro. In Figura 392 è mostrato il concentratore dati connesso al misuratore.

Il prototipo sviluppato trasferisce, utilizzando moderni approcci per la trasmissione in sicurezza, le informazioni acquisite ad un nodo concentratore di livello superiore che verifica accuratezza ed affidabilità del dato attraverso l'analisi combinata delle letture da differenti misuratori.

Sviluppi futuri possono essere la definizione di misurabilità di ulteriori parametri in maniera diretta indiretta anche con diversi livelli di ridondanza funzionale. Ciò consentirà di sviluppare anche una valutazione della sensibilità parametrica dei risultati di misura individuando ed migliorando la robustezza dell'intero sistema di misura con l'inclusione di tecniche per la gestione della verifica ed autotaratura periodica dei dispositivi di misura. Inoltre i protocolli di comunicazione potrebbero essere calati nell'approccio di tipo open metering e cioè standard di libero accesso per ottenere la massima interoperabilità tra differenti apparecchiature.

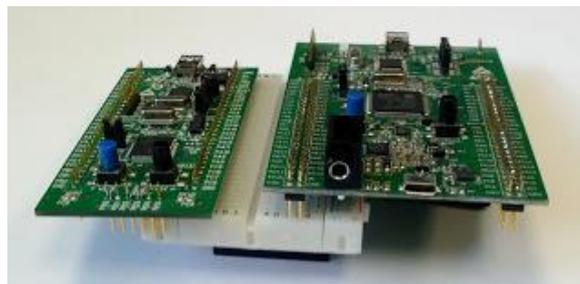


Figura 392. Prototipo del misuratore con concentratore di dati

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/136.

b. Gestione ottimale reti di edifici

Politecnico di Torino, Dipartimento Energetica

L'attività di ricerca condotta dal gruppo del Politecnico di Torino si è declinata secondo diverse fasi e obiettivi finalizzati all'individuazione di metodologie per la diagnostica degli edifici.

- *Sviluppo e studio di un piano di monitoraggio energetico e ambientale e definizione di un kit di misura ottimale per edifici in contesto urbano con differente destinazione d'uso*

L'attività consiste nella definizione delle specifiche di un kit di monitoraggio ottimale dal punto vista tecnico ed economico per lo sviluppo di un piano di monitoraggio di edifici situati in contesto urbano. La ricerca si è concretizzata in uno studio sperimentale condotto attraverso l'utilizzo di casi studio: è stata condotta un'attenta analisi prendendo in considerazione un campione rappresentativo di edifici pubblici, all'interno del quale ne sono stati identificati due con destinazione d'uso diversa e ritenuti adatti allo sviluppo dell'attività. Il primo è una scuola elementare, mentre il secondo è un edificio con destinazione d'uso ufficio, i quali sono stati oggetto di audit energetico, eseguito con le finalità di raccogliere dati di natura architettonica, impiantistica e gestionale indispensabili alla stesura di un piano di monitoraggio mirato alla misura di parametri energetici ed ambientali e all'attuazione dei sistemi energetici. L'attività ha portato alla definizione di un kit minimo di monitoraggio, di facile installazione, configurazione e di basso impatto, in grado di identificare un equilibrio tra la quantità/qualità della strumentazione installata in campo e i relativi costi, individuando una soluzione capace di operare processi diagnostici efficaci e realisticamente esportabile sul mercato in contesti urbani e applicabile in edifici con diversa destinazione d'uso.

- *Verifica funzionale in fase operativa dei sistemi di monitoraggio in campo operanti su "smart district" e analisi della qualità dei dati raccolti*

L'attività è consistita nella verifica del corretto funzionamento della sensoristica del sistema di monitoraggio energetico e ambientale indoor implementato sul distretto di edifici presso il centro ENEA della Casaccia. La prima parte dell'attività si è concentrata sulla verifica della corrispondenza tra il piano di monitoraggio energetico ed ambientale sviluppato all'interno del attività "Sviluppo di una metodologia per la diagnostica remota di reti di edifici: applicazione su un caso pilota" e l'installazione/configurazione della sensoristica inserita all'interno degli otto edifici componenti il cluster (e connessa centrale termica del distretto). La stessa operazione è stata parallelamente effettuata per gli strumenti di monitoraggio rilevatori dei parametri del clima esterno. Dall'analisi effettuata si sono evidenziate differenze rispetto al piano di monitoraggio solo per quanto riguarda la misura dei parametri ambientali: mentre nella versione originale per ogni edificio erano previsti due sensori di temperatura ed umidità relativa da disporsi in locali rappresentativi con diverse esposizioni, la nuova configurazione ha presentato un solo sensore di temperatura situato al centro del corridoio di ciascun edificio, non risultando quindi rappresentativo della qualità termo igrometrica indoor. L'analisi condotta ha fornito risultati positivi: malgrado la presenza di alcuni errori e dati di monitoraggio mancanti, nel complesso la verifica effettuata ha confermato l'attendibilità dei dati al fine della loro successiva elaborazione. La verifica ha inoltre consentito di evidenziare alcune problematiche per cui è stata trovata una soluzione.

- *Elaborazione e analisi dati energetici e microclimatici del monitoraggio in campo ai fini diagnostici di “primo livello”: profili di consumo e qualità climatica indoor, tendenze e benchmarks*

Sulla base dei dati raccolti dal cluster degli 8 edifici in esame sono stati costruiti i grafici delle distribuzioni di frequenza della temperatura interna misurata al fine di sintetizzare i dati raccolti e valutarne le tendenze. Lo scostamento visibile ad occhio tra la “forma” della curva degli assorbimenti orari di energia elettrica e termica rispetto ad un “pattern” atteso o ricorrente tra gli edifici costituenti il cluster permette di ricavare informazioni utili alla rilevazione di sprechi. Nel tentativo di caratterizzare la “forma del profilo”, sono stati definiti e calcolati sui profili orari un insieme di parametri statistici che consentono una schematizzazione della forma in tratti associati ai momenti della giornata. La seconda parte dell’attività ha riguardato il confronto degli indicatori, calcolati in base ai dati misurati per ogni mese, per il periodo invernale e per il periodo estivo. La valutazione degli indicatori per tutti gli edifici costituenti il cluster è stata sviluppata tenendo la separazione tra dati elettrici e dati termici e calcolando il rapporto tra l’energia assorbita e la superficie e l’energia assorbita ed il numero di presenze rilevate nel periodo di analisi di volta in volta considerato. Il confronto degli indicatori di prestazione energetica, calcolati come descritto sopra, è avvenuto per mezzo di un modello di regressione multipla a due variabili indipendenti atto a identificare un “piano medio” di prestazione.

- *Sviluppo di modelli di diagnostica avanzata (“secondo livello”) attraverso i dati del monitoraggio in campo*

La ricerca condotta ha previsto la verifica delle potenzialità e dei limiti di tre differenti tecniche di data mining per condurre analisi di fault detection su valori di energia e potenza relativi all’uso finale illuminazione. In particolare sono state sperimentate le potenzialità di un algoritmo di classificazione (CART), e di due tecniche di clustering (K-Means e DBSCAN). L’obiettivo primario è stato quello di individuare metodologie robuste e affidabili finalizzate alla partizione dei data set analizzati in classi omogenee prima di condurre analisi di individuazione delle anomalie.

Verifica e applicazione di tecniche di “neural ensembling” per analisi di fault detection

In questa fase è stata condotta un’analisi dei consumi energetici di edifici tramite tecniche di “neural ensembling” per la rilevazione di comportamenti energetici anomali (fault detection). Ai fini dell’analisi di fault detection sono state adoperate due tecniche di ensembling di reti neurali artificiali (RNA): un ensembling consiste in un insieme di modelli (in questo caso RNA) che lavorano sullo stesso problema in modo da ottenere risultati più robusti rispetto a quelli dei singoli modelli. Gli output dei modelli neurali sono stati poi combinati secondo lo schema del Majority Voting Ensemble Method (MVEM): questo schema associa l’uscita del sistema (0 o 1) alla classe sulla quale converge almeno la metà dei modelli. I risultati sperimentali hanno dimostrato anche in questo caso l’efficacia della suddetta tecnica di neural ensembling nell’individuazione delle anomalie di consumo illuminazione verificatesi nella settimana di testing.

Analisi diagnostica relativa all’utilizzo illuminazione artificiale basata sulla disponibilità di luce naturale

L’attività di ricerca condotta ha previsto l’analisi e la determinazione numerica per alcuni uffici dell’edificio F40 della disponibilità di luce naturale, al fine di individuare attraverso robuste indagini diagnostiche opportunità legate al suo corretto sfruttamento (daylight harvesting). Al fine di condurre un’analisi diagnostica è stato costruito un modello numerico con il codice Daysim. Attraverso il codice è stato simulato in regime dinamico il livello di illuminamento interno garantito attraverso il daylighting considerando un’opportuna griglia di punti per due uffici tipologici caratterizzati da una diversa esposizione. Sulla base dei risultati delle simulazioni condotte lo studio si è focalizzato sulla costruzione di un modello inverso del tipo black box che permettesse di stimare il valore di illuminamento medio interno utile note le condizioni climatiche esterne e le caratteristiche dell’ambiente oggetto di studio. La tecnica utilizzata per la modellazione dell’illuminamento è stata il BEM di reti neurali. Attraverso il modello stimativo del livello medio di illuminamento interno sviluppato, è risultata possibile l’implementazione di una ulteriore indagine diagnostica avanzata.

Analisi di ottimizzazione

Come completamento all’attività di gestione del comportamento energetico dell’edificio F40, sono state poste le basi per un’analisi di ottimizzazione multiobiettivo della richiesta energetica per la climatizzazione ambientale e delle condizioni di comfort interno per l’edificio. In particolare, le variabili di progetto considerate per l’ottimizzazione sono le temperature di set-point dei termostati di stanza e la temperatura del fluido vettore di mandata proveniente dalla centrale termica e frigorifera. L’obiettivo è quello di individuare le soluzioni di ottimo (i valori delle suddette temperature) in grado di garantire il miglior compromesso tra la potenza termica da erogare/sottrarre (e, quindi, i costi economici da sostenere) ed il comfort degli occupanti.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/121.

Università Roma TRE, Dipartimento Informatica ed Automazione

Nell'ambito della realizzazione del dimostrativo dello "Smart Village" nel Centro Ricerche ENEA Casaccia sono stati sviluppati degli algoritmi di ottimizzazione multiobiettivo al fine di attuare politiche di controllo ottimizzate sugli edifici.

La piattaforma integrata realizzata nelle precedenti annualità (RdS/2012/230) ci ha consentito di applicare metodologie di diagnostica avanzata al fine di monitorare il comportamento energetico degli edifici e di poter intervenire qualora fosse possibile al recupero del guasto o, in alternativa, alla segnalazione dell'anomalia. L'obiettivo dell'annualità corrente è quello di attuare delle logiche di controllo ottimizzate al fine di prevenire sprechi e cattive gestioni dell'utenza. A tale scopo è stato realizzato in collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche un simulatore che approssima il comportamento energetico di un edificio all'interno del Centro Ricerche "Casaccia".

Il simulatore, dati come input i set-point di temperatura dei termostati che afferiscono a delle zone preimpostate dell'edificio e la temperatura di mandata dell'acqua in centrale termica, fornisce i valori elettrici, termici e ambientali dell'edificio. Tali valori costituiscono l'input delle funzioni obiettivo, realizzate in collaborazione con il Politecnico di Torino, da ottimizzare. In particolare le funzioni obiettivo sono due: una fornisce un valore adimensionale relativo al comfort dell'utente, l'altra un valore relativo alla quantificazione del consumo energetico.

Tali problemi rientrano nella categoria dell'ottimizzazione multiobiettivo, in quanto lo scopo è massimizzare il comfort dell'utente e contemporaneamente minimizzare i consumi termici. Per i problemi di ottimizzazione multiobiettivo la scelta migliore sono gli algoritmi evolutivi, in quanto, essendo basati su una popolazione iniziale, esplorano in maniera più efficiente lo spazio delle soluzioni. Sono stati eseguiti test su dei problemi di ottimizzazione multiobiettivo di benchmarking con l'algoritmo NSGA-II ed i risultati, misurati con delle metriche note in letteratura, sono stati soddisfacenti.

L'applicazione sulle funzioni obiettivo precedentemente descritta è risultata in prima istanza problematica, in quanto la valutazione del valore della fitness delle due funzioni dipende dall'output del simulatore, un processo che richiede un calcolo computazionale non trascurabile. Poiché gli algoritmi genetici si basano su un numero elevato di valutazioni della fitness, il processo di ottimizzazione in questo caso risente del collo di bottiglia dovuto all'elaborazione del simulatore, è stato ritenuto opportuno fare uso della fitness approximation, un approccio in cui in realtime viene costruito un modello che approssima le funzioni di fitness mappando gli input al simulatore e l'output delle funzioni.

Funzioni obiettivo dell'edificio F40

Ai fini dell'ottimizzazione sono state definite due funzioni di fitness che tengono conto anche dei valori di output del simulatore. La funzione di fitness del comfort si basa sul Predicted Mean Vote (PMV) definito dal modello di Fanger, un indice adimensionale nel dominio $[-3,3]$ in cui 0 è lo stato ottimale di comfort dell'utente e da Ndis, un indice del numero di ore in cui il valore assoluto del PMV $> 0,5$. La funzione obiettivo del comfort è la PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) definita dal PMV e da una funzione di penalità basata su Ndis.

La funzione di fitness relativa ai consumi energetici si basa sull'energia primaria richiesta per fornire calore durante la stagione invernale e raffrescamento nella stagione estiva sommata all'energia elettrica invece ha tenuto conto della somma dell'energia primaria per l'intero edificio richiesta per il riscaldamento (nella stagione invernale) o per il raffrescamento (nella stagione estiva) e dell'energia elettrica convertita in primaria richiesta dai ventilatori dei fancoil.

Fitness approximation

La fase successiva dell'attività si è focalizzata sulla realizzazione di un processo di ottimizzazione supportato dalla fitness approximation, ovvero la stima di una o più funzione di fitness di un problema di ottimizzazione. Eseguendo l'ottimizzazione sulla fitness stimata è possibile indirizzare l'ottimizzazione della fitness reale verso zone dello spazio di decisione più promettenti, accelerando così il processo e diminuendo il numero di richieste di performance necessarie per ottenere un risultato soddisfacente di ottimizzazione. Tale stima può essere ottenuta con diverse metodologie: modelli polinomiali, di Kriging, reti neurali artificiali o tramite le Support Vector Machines (SVM). Nella nostra attività abbiamo testato l'approccio con modelli polinomiali e con le reti neurali. Per testare l'efficacia dell'algoritmo è stato confrontato NSGA-II con e senza approssimazione sui problemi multiobiettivo ZDT.

L'attività successivamente si è focalizzata sull'applicazione dell'algoritmo NSGA-II con fitness approximation al problema di ottimizzazione della gestione dei set-point di temperatura dell'edificio F40 in cui si persegue la minimizzazione dei consumi energetici e la massimizzazione del comfort dell'utente.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/122.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Le attività dell'Università Politecnica delle Marche si sono incentrate sullo sviluppo di un simulatore dei consumi termici di un edificio e di una rete di edifici.

Modellazione termica multilivello dell'edificio F40

L'edificio F40 del Centro Ricerche Casaccia è uno stabile di tre piani, la pianta ha una struttura ad "L" ed è orientato 15° direzione Nord Ovest. All'interno della struttura si trovano gli uffici dei ricercatori, i laboratori, le sale conferenza, i servizi igienici, un corridoio centrale per piano e i locali tecnici dedicati al controllo degli impianti. I locali dello stabile hanno una metratura differente, il che comporta un diverso valore di volume d'aria da scaldare o da deumidificare qualora sia presente un termoconvettore. La programmazione della variabile .BAS dell'edificio F40 può essere impostata secondo diversi livelli di accuratezza e caratterizzazione in funzione del numero di zone microclimatiche che si vanno ad inserire. E' quindi possibile pensare ad ogni stanza come una zona microclimatica da controllare e simulare in base alla potenza del terminale o dei terminali di impianto termico installati ed in base al profilo di utenza scelto per quella zona. Se decidiamo di assegnare ad ogni stanza del fabbricato una zona microclimatica il numero di stringhe di codice aumenterà notevolmente perché si dovranno inserire per ogni zona tutti i comandi relativi ai muri interni, alle porte, al mobilio e ai profili termici. Risulta chiaro che l'elaboratore impiegherà più tempo nel risolvere le equazioni di bilancio termico per un modello multizona piuttosto che per un modello monozona. Sarà quindi compito del programmatore scegliere il giusto compromesso fra livello di caratterizzazione dello stabile e velocità di processamento dei dati.

Per alleggerire il carico di calcoli è stato pensato un nuovo modello semplificato definito dal punto di vista termico con un singolo valore per la temperatura e per l'umidità relativa, che si compone dei seguenti sottosistemi:

- Il sub system della Centrale termica con funzione switch
- Il sub system del Distributore
- Il sub system del Termostato
- Il sub system dei Contatori Energetici.

Risultati del modello

La Tabella 84 fornisce l'elenco dei parametri termodinamici simulati indicando anche quale subsystem fornisca in output il dato in questione.

Tabella 84. Riepilogo possibili output

Sub System	Parametro Termodinamico	Simbolo	Unità di Misura
HAMbase	Temperatura Interna Aria	Tair	[°C]
	Temperatura Radiante	Ts	[°C]
	Umidità Relativa Interna	Rh	Adim
	Pressione Interna	Pzone	[Pa]
	Temperatura Esterna	Te	[°C]
	Umidità Relativa Esterna	Rhe	Adim
FanCoil	Potenza Termica Fornita	Q_zone	[W]
	Temp. Radiante Fluido	T_r_zone	[°C]
	Temp. Aria uscita Fancoil	T_out_zone	[°C]
Collettore	Temp. Ritorno Collettore	T_r_mean	[°C]
Centrale Termica	Potenza Termica Fornita	Q_u	W
	Portata Volumetrica Gas	flow_ch4	m ³ /h
	Potenza Elettrica	Q_e	W
	Energia Termica Fornita	E_u	kWh
	Volume Gas Consumato	used_ch4	m ³
	Energia Elettrica Assorbita	E_e	kWh

L'evoluzione libera delle temperature segue un andamento a denti di sega in quanto è influenzata dalla temperatura esterna dall'irradiazione solare. Durante il giorno quindi le temperature interne salgono toccando un valore di punta fra le 12 e le 18 mentre durante la notte scendono.

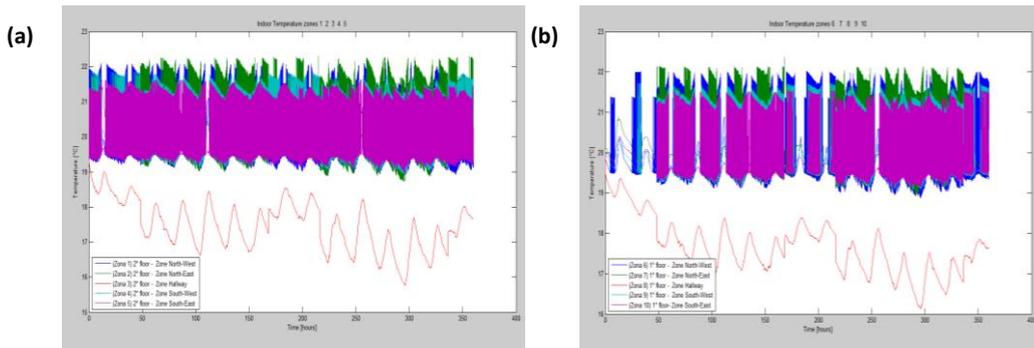


Figura 393. Temperature invernali Secondo Piano (a) e Primo Piano (b) Edificio F40

Di seguito si riportano alcuni risultati del modello a 15 zone, con termostato impostato a 20 °C in inverno e a 25 °C in estate. Le temperature “fuori controllo” sono quelle dei locali non scaldati/climatizzati (corridoi).

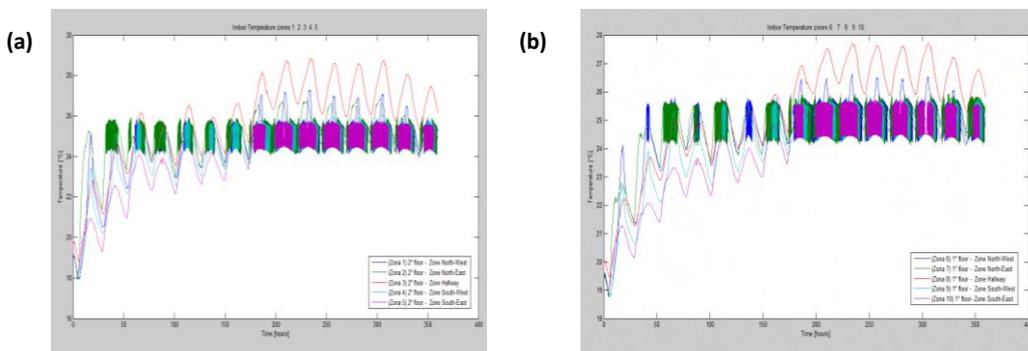


Figura 394. Temperature Interne Invernali Secondo Piano (a) e Primo Piano (b) Edificio F40

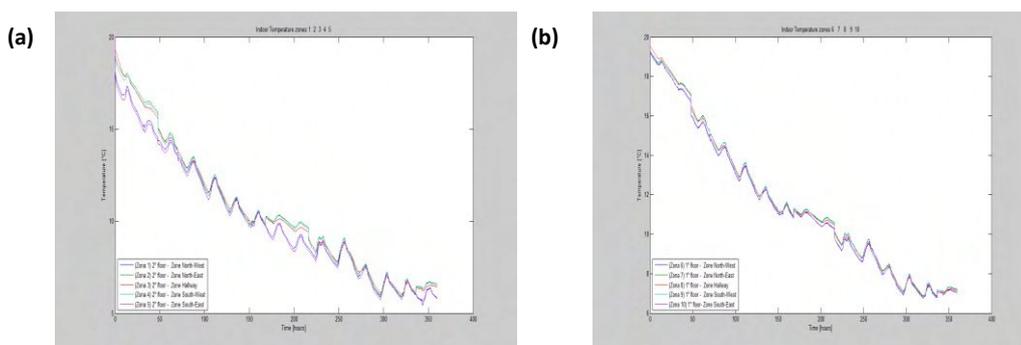


Figura 395. Temperature Interne estive Secondo Piano (a) e Primo Piano (b) Edificio F40

Modellazione multilivello del cluster di edifici

La modellazione monozona trova il suo campo di applicazione nella programmazione del simulatore per la gestione energetica non di un singolo edificio ma di un gruppo di fabbricati.

Se vogliamo infatti simulare l’andamento dei consumi energetici dei terminali termici installati nei singoli edifici di un distretto di stabili, dobbiamo fornire in input all’elaboratore molteplici file che devono contenere un livello di dettaglio modesto al fine di non appesantire troppo la computazione del software. Il termine "cluster" nel nostro caso indica un insieme di stabili caratterizzati da medesime caratteristiche impiantistiche ed è stato simulato in MATLAB/Simulink creando una “rete” di edifici.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/120.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Scienze Chimiche

Al Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli "Federico II" è stato sintetizzato un materiale innovativo luminescente nella regione blu del visibile ed appartenente alla famiglia dei triazatruxeni (TAT). Tale materiale è stato caratterizzato dal punto di vista spettroscopico e di stabilità termica. Sono state definite le condizioni di processo per depositare tale materiale in forma di film sottile. L'attività inerente la fabbricazione di dispositivi OLED, utilizzando il TAT come materiale attivo, è stata successivamente svolta in collaborazione con il Centro ENEA di Portici.

Nello specifico l'attività dell'Università di Napoli ha riguardato la sintesi e la caratterizzazione spettroscopica dei triazatruxeni (TAT) 1a e 1b (Figura 377). Per la sintesi è stata seguita una procedura messa a punto in precedenza. In particolare, trattando il 5,6-dimetossiindolo, disponibile in commercio, con il persolfato di sodio in mezzo acquoso acido è possibile ottenere in un unico stadio i due TAT isomerici 1aNH e 1bNH, il primo caratterizzato da una simmetria di tipo C_3 e il secondo asimmetrico, isolati in miscela mediante centrifugazione. Al fine da migliorare la loro solubilità, la miscela dei due TAT è stata sottoposta ad *N*-alchilazione con 1-bromoundecano/KOH in DMSO anidro sotto flusso di argon. Dopo 18 ore, la miscela di reazione è stata estratta con cloroformio ed una soluzione acquosa di HCl 1:5 M, anidrificata e sottoposta a separazione cromatografica su gel di silice. Questo ha permesso di ottenere i due TAT 1a e 1b per la prima volta in forma pura ed in rese soddisfacenti.

I TAT isolati sono stati quindi caratterizzati mediante risonanza magnetica nucleare mono- e bidimensionale (1D e 2D NMR), spettrometria di massa, spettroscopia UV-visibile e di fluorescenza. E' stato inoltre esaminato il comportamento termico di 1a e 1b mediante analisi termogravimetrica (TGA).

Lo spettro ^1H NMR del composto 1a ha mostrato un semplice pattern di segnali dovuti alla simmetria della molecola. È possibile notare infatti due singoletti a δ 7,85 e 7,37 relativi ai protoni aromatici dell'anello indolico, un tripletto a δ 4,97 relativo ai protoni del gruppo etilenico della catena alifatica in α all'azoto indolico, due singoletti a δ 4,01 e 4,00 relativi ai protoni del gruppo metossile, un multipletto a 1,83 relativo ai protoni del gruppo metilenico in β rispetto all'azoto indolico, un multipletto a δ 1,0-1,3 e un tripletto a δ 0,84 relativi ai protoni dei gruppi metilenici e metilici della catena alifatica. Lo spettro ^{13}C NMR ha mostrato le otto risonanze del nucleo indolico nella regione dei carboni aromatici, due segnali a δ 57,5 e 56,4 relativi ai carboni dei gruppi metossilici, e nella regione a campi alti le risonanze della catena alifatica.

Gli spettri ^1H e ^{13}C NMR del composto 1b appaiono più complessi rispetto a quelli del composto 1a a causa dell'asimmetria della molecola. In particolare, lo spettro ^1H NMR ha mostrato cinque singoletti a δ 8,33, 8,30, 7,93, 7,43 (due protoni) e 7,38, tre tripletti a δ 4,99, 4,77 e 4,67 relativi ai protoni gruppo metilenico della catena laterale, quattro singoletti a δ 4,12 (3H), 4,11 (3H), 4,03 (3H) e 4,02 (2 \times 3H) relativi ai protoni dei gruppi metossilici, un multipletto a δ 1,4-0.6 relativo ai protoni dei gruppi metilenici e metilici della catena alifatica. Lo spettro ^{13}C NMR ha mostrato le risonanze di tre unità indoliche.

L'analisi di massa effettuata con la tecnica Laser Desorption Ionization (LDI) ha mostrato per entrambi i composti il picco relativo allo ione pseudomolecolare a m/z 988, confermandone la struttura.

Le proprietà ottiche dei TAT sintetizzati sono state studiate mediante spettroscopia UV-visibile e fluorescenza, sia in soluzioni diluite in THF (1×10^{-5} M) sia in film sottile su quarzo. In Tabella 85 sono riassunti i dati foto-fisici di 1a e 1b.

Tabella 85. Dati foto-fisici di TAT 1a e 1b in soluzione e in film

Composto	λ_{max} , nm (log ϵ , $\text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	λ_{max} , nm (film)	λ_{em} , nm (λ_{ex})	Φ (%) ^(a)	E_g^{opt} (eV) ^(b) soluzione/film
1a					
THF	260, 331 (4.90), 340 (sh), 355 (sh), 371 (sh)	260, 334, 344 (sh), 361 (sh)	402 (331)	27	3.15/3.08
1b					
THF	257, 323 (sh), 333 (4.41), 365 (4.22), 379 (4.25), 394 (sh)	257, 325 (sh), 335, 368 (sh), 383 (sh), 398 (sh)	423 (333)	39	2.97/2.93

a) Resa quantica di fluorescenza relativa al solfato di chininio in H_2SO_4 0.5 M ($\Phi = 0.546$)

b) Band gap ottico stimato dalla discesa del massimo di assorbimento a lunghezza d'onda maggiore

Nel complesso, i dati riportati in tabella 85 suggeriscono che l'isomero asimmetrico 1b ha delle caratteristiche spettrofotometriche più promettenti per quanto riguarda la sua potenziale applicazione nella realizzazione di dispositivi OLED.

I dati forniti dall'analisi TGA condotta su 1a e 1b hanno evidenziato una maggiore stabilità termica dell'isomero simmetrico ($T_d = 271^\circ\text{C}$) rispetto al suo analogo asimmetrico ($T_d = 177^\circ\text{C}$).

Politecnico di Milano, Dipartimento di Design

Il Politecnico di Milano Dipartimento di Design ha svolto ricerca progettuale applicata al risparmio energetico conseguibile tramite l'utilizzo di sorgenti di luce LED nell'illuminazione di interni ed esterni, comprendente anche misure per la valutazione dei prototipi integranti sorgenti LED e per la validazione dei risultati ottenuti.

La nuova tendenza nella progettazione degli spazi dell'ufficio è: dall'ufficio stereotipato all'ufficio antropizzato, per restituire lo spazio del lavoro a chi tale lavoro svolge. Contesto spaziale, oggetti che ne fanno parte e condizioni ambientali di tale spazio devono essere personali e personalizzabili, flessibili e trasformabili, semplici da utilizzare (anche se tecnologicamente avanzati). L'illuminazione, quindi la qualità della luce, rappresenta chiaramente un elemento importante, con i suoi effetti visivi e non visivi, con una giusta attenzione all'efficienza energetica e all'impatto ambientale.

Le tendenze della progettazione illuminotecnica per uffici oggi sono: smaterializzazione, dimensioni minime, luce dinamica, personalizzazione, flessibilità e integrazione.

Per la progettazione di COELO si sono analizzati i sistemi di generazione di luce bianca con tecnologia allo stato solido, mettendo in evidenza pregi e difetti di ciascuno in relazione ad aspetti di efficienza e di qualità cromatica della luce emessa, sulla base di un benchmark di prodotti semilavorati costruiti con diverse tecnologie, comprendendo anche misure di laboratorio su alcuni esemplari. Si sono anche analizzate le possibili soluzioni tecnologiche per il sistema ottico.

Sono state individuate quindi tre differenti tecnologie per la generazione di luce bianca, con pacchetti di flusso luminoso consistente: COB/LLE, Fosfori remoti, Moduli a tecnologia ibrida (bianco a conversioni di fosfori e led rossi).

Partendo dalla scomposizione e ricomposizione funzionale di un apparecchio di illuminazione classico da ufficio (design by components) e prendendo in considerazione come elementi chiave la massima efficienza parallelamente al massimo comfort, si è concepito un prodotto di illuminazione caratterizzato da diversi blocchi logici funzionali:

- motore luminoso con riflettore esterno (per un'illuminazione indiretta);
- scocca di assemblaggio esterna (configurabile);
- alimentazione e connessioni (montaggio a sospensione o inserita in un modulo 60 x 60).

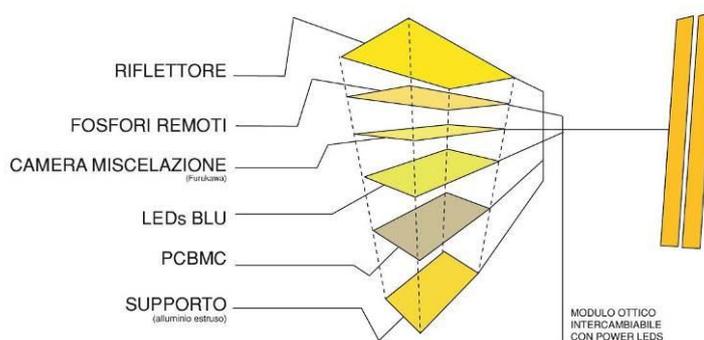


Figura 396. Scomposizione e ricomposizione funzionale di un apparecchio di illuminazione

Sistema COELO è declinato in un sistema prodotto di illuminazione per mezzo di elementi componibili: il singolo COELO può essere utilizzato in coppie (montandone due in maniera contigua o libera) oppure in configurazioni che prevedano l'utilizzo di più moduli (disposti in linea oppure ravvicinati). L'apparecchio di tipo modulare è più flessibile e in grado di meglio soddisfare diverse esigenze e applicazioni.

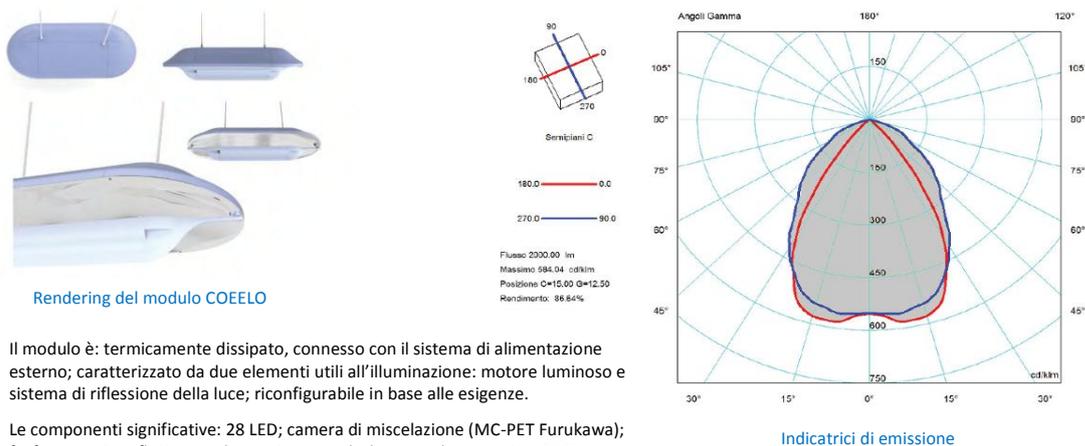
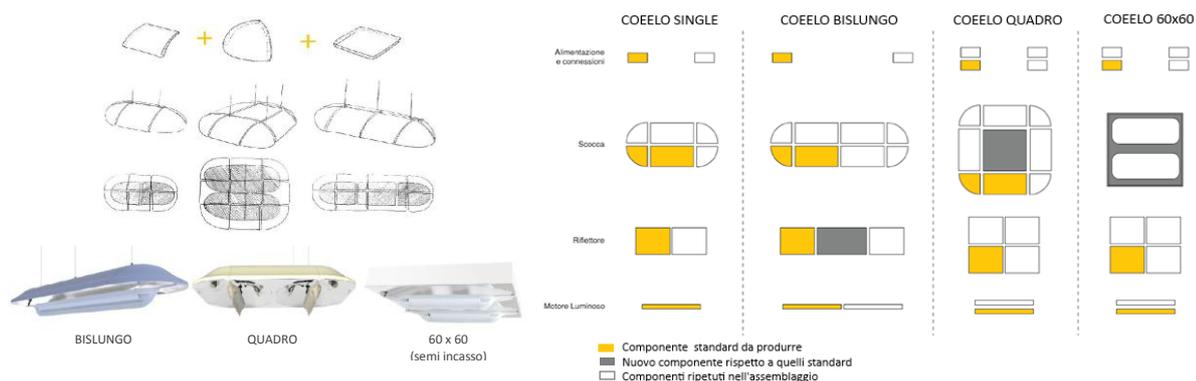


Figura 397. Singolo modulo COELO

Il sistema modulare e riconfigurabile prevede l'utilizzo di un numero di elementi diversi ripetuti e assemblati in maniera tale da costituire la configurazione desiderata. In particolare, sia il riflettore, sia gli elementi di cover superiore sono stati studiati al fine di poter essere opportunamente montati per soddisfare diverse soluzioni di design.



Una seconda attività del Politecnico di Milano Dipartimento di Design ha riguardato il supporto per la prototipazione di PLUS ME: sono stati revisionati alcuni aspetti rispetto al progetto precedente, sia a causa della rapida innovazione delle sorgenti di luce LED, sia per identificare configurazioni possibili del modulo utili per cercare di estenderne le funzionalità e i campi di applicazione inizialmente previsti. Sono inoltre stati proposti suggerimenti relativi all'impiego del prototipo in successive attività di sperimentazione e misura. Sono stati forniti in dettaglio i disegni tecnici e i modelli tridimensionali per la realizzazione del prototipo e c'è stata una fruttuosa interazione con la ditta Neri che ha realizzato il prototipo.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nei rapporti RdS/2013/112 e 113.

Università di Milano, Dipartimento di Informatica

L'Università di Milano, Dipartimento di Informatica, ha investigato la parte teorica alla base dei test percettivi per la quantificazione dell'indice di resa cromatica attraverso utenti.

I test si sono basati su configurazioni visuali classiche, su situazioni metameriche e su configurazioni spaziali interessanti, con lo scopo di valutare anche la robustezza degli indici di resa cromatica sotto esame.

Le immagini che noi consideriamo essere "illusioni ottiche" sono configurazioni visive che non si comportano come ci aspetteremmo da un modello puntuale (cioè fuori contesto) del colore. Esse al contrario ci parlano di come funziona il sistema visivo umano. Grazie allo studio di queste configurazioni sono state identificate importanti proprietà del sistema visivo umano. Seguendo questa idea è stato ideato un esperimento che facesse uso di un'illusione ottica (illusione di Albers), per studiare l'influenza di una particolare configurazione spaziale sulla

percezione del colore sotto diverse sorgenti di luce. Data la complessità dei meccanismi visivi i dati ottenuti da questa ricerca preliminare necessitano di ulteriori approfondimenti.

Il test consisteva nel confronto di stampe di riferimento con stampe contenenti una serie di campioni (Figura 399).

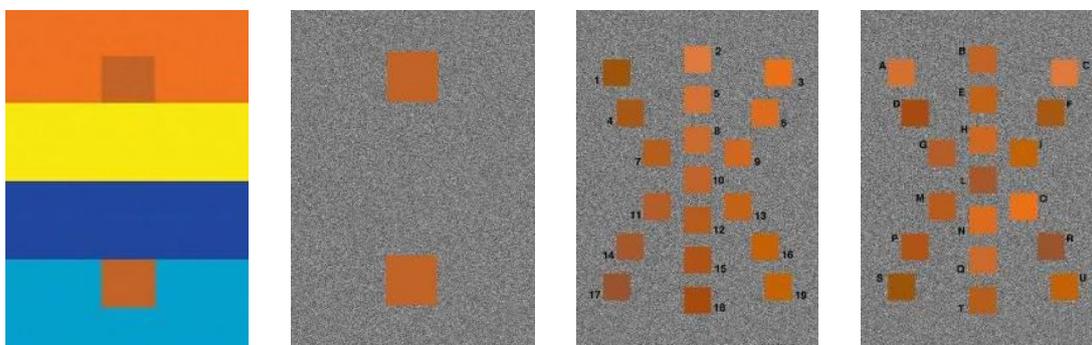


Figura 399. Stampe di riferimento e stampe contenenti una serie di campioni

In Tabella 86 i risultati del test. I dati vanno letti come segue: “14 (34)” significa che 34 persone hanno considerato la patch 14 come la più simile a quella di riferimento.

Tabella 86. Risultati dei test

Sorgente di luce	Patch nel contesto		Patch non nel contesto	
	Patch su sfondo arancione	Patch su sfondo azzurro	Patch alta su sfondo BN	Patch bassa su sfondo BN
B1S1	14 (34) 18 (28) 4 (28)	16 (29) 8 (29) 9 (28)	10 (37) 13 (34) 12 (19)	13 (45) 8 (29) 16 (25)
B2S1	14 (35) 4 (30) 1 (21)	8 (36) 13 (30) 16 (24)	10 (47) 13 (25) 12 (25)	13 (50) 8 (28) 10 (27)
B3S1	14 (45) 4 (29) 1 (23)	9 (32) 8 (28) 13 (21)	10 (49) 13 (33) 12 (22)	10 (36) 12 (28) 13 (23)
B4S1	4 (38) 14 (32) 17 (17)	8 (34) 13 (33) 11 (20)	10 (50) 12 (42) 8 (14)	12 (50) 10 (27) 8 (22)
B1S2	14 (49) 4 (34) 18 (21)	8 (43) 9 (35) 13 (27)	13 (37) 10 (37) 12 (27)	13 (47) 8 (26) 10 (25)
B2S2	14 (36) 18 (27) 4 (24)	8 (33) 13 (29) 9 (28)	10 (41) 13 (33) 12 (24)	13 (33) 10 (29) 8 (22)
B4S2	4 (48) 14 (28) 1 (19)	8 (38) 9 (28) 16 (19)	8 (40) 10 (28) 9 (25)	8 (39) 10 (31) 13 (25)

In Figura 400 si riporta qui un esempio di analisi più approfondita: sono le risposte con lo stesso illuminante (B1S1) ma con la patch di riferimento con contorno o posizione diversa.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/108.

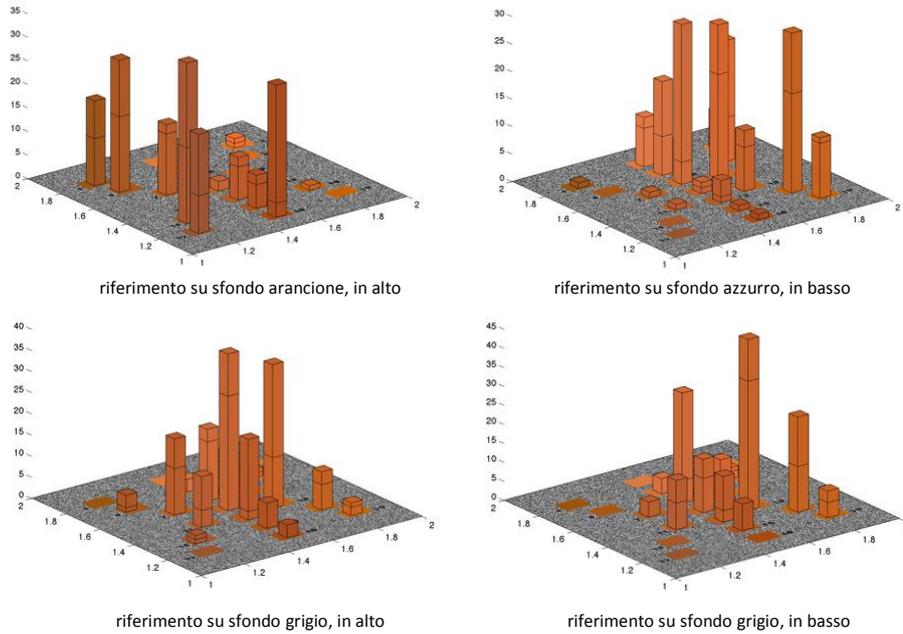


Figura 400. Analisi delle risposte ai test di resa di colore

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

L'Università ha predisposto e realizzato un'attività sperimentale, con la finalità di confrontare l'esecuzione di compiti cognitivi (da parte di partecipanti volontari) svolti con due differenti tipologie di illuminazione: una realizzata con lampade alogene, l'altra con sorgenti LED. Nei due differenti compiti, Cambio di Compito Volontario e Visualizzazione delle Rotazioni, vengono testate le funzioni esecutive e le abilità visuo-spaziali dei soggetti partecipanti. E' stata inoltre valutata attraverso test di autovalutazione se i partecipanti hanno riscontrato nelle due situazioni luminose differenti richieste mentali, fisiche e temporali, nonché differenze nei livelli di performance, sforzo e frustrazione durante l'esecuzione dei compiti.

L'attività sperimentale è stata condotta nel laboratorio di Illuminotecnica dell'Università, all'interno di una cabina sperimentale disegnata e realizzata allo scopo, priva di apporto di luce naturale, arredata con un tavolo da lavoro + sedia + postazione computer. All'interno della cabina sono state misurate temperatura ambiente e umidità relativa, mentre la temperatura superficiale dei corpi è stata rilevata tramite termocamera.

Sono stati formati due gruppi, uno sperimentale e uno di controllo. La prova è stata suddivisa in due sessioni (di base e test) durante ciascuna delle quali i soggetti eseguivano le prove sperimentali, il test di Rotazione Mentale (ROT) e Task Switching²⁷; tra le due sessioni intercorrevano 20 minuti di pausa durante i quali ai partecipanti è stato chiesto di compilare il questionario NASA-TLX, il test di Associazione Simboli-Numeri e il questionario di anamnesi.

Il gruppo di controllo ha eseguito sia la sessione di base che la sessione di test, nonché la pausa, con l'illuminazione delle sole lampade alogene, mentre il gruppo sperimentale ha eseguito la sola sessione di base con le sorgenti alogene, per poi passare alla sessione di test con l'illuminazione dei LED (Tabella 87):

Il monitoraggio ambientale effettuato durante lo svolgimento dell'intero esperimento mostra che i parametri ambientali si modificano con andature differenti nei due gruppi (sperimentale e di controllo), facendo intuire un effetto indiretto delle due sorgenti sulla qualità dell'aria della cabina, effetto a tutt'oggi ancora da esaminare, valutare ed approfondire, anche in relazione alle risposte ottenute dalle misure termografiche eseguite.

I risultati sperimentali mostrano come l'esposizione alla radiazione blu incida sulle prestazioni umane, nell'esecuzione di compiti complessi riguardanti le funzioni esecutive e le capacità visuo-spaziali. Ad esempio, durante il test di Rotazione Mentale, i partecipanti sono stati significativamente più accurati, fornendo un maggior numero di risposte corrette, dopo 20 minuti di esposizione ai LED piuttosto che sotto sorgenti alogene. Di contro, i

²⁷ I test sono descritti nel rapporto tecnico di riferimento. Sono test basati su immagini, simboli grafici, lettere ecc. Ad esempio il test di rotazione mentale valuta la capacità di riconoscere una forma 3D vista con diverse angolazioni

soggetti appartenenti al gruppo di controllo, che hanno eseguito lo stesso compito cognitivo per due volte con lampade alogene, non hanno mostrato gli stessi risultati: quindi il miglioramento riscontrato nel gruppo sperimentale non è dovuto all'effetto di apprendimento per ripetizione dello stesso compito.

Tabella 87. Procedura sperimentale

	Sessione Base	Pausa	Sessione Test		
Prove	PROVA 1	PROVA 2	NASA-TLX ASSOCIAZIONE SIMBOLI- NUMERI ANAMNESI	PROVA 1	PROVA 2
Gruppi					
sperimentale	ALOGENE	ALOGENE	ALOGENE	ALOGENE	ALOGENE
di controllo	ALOGENE	ALOGENE	LED	LED	LED

Entrambi i gruppi sono stati più veloci durante la sessione test rispetto alla sessione base, sicuramente per un effetto di apprendimento; i partecipanti del gruppo sperimentale hanno comunque mostrato un miglioramento nella velocità delle proprie reazioni maggiore rispetto ai soggetti del gruppo di controllo: probabilmente l'assenza di un effetto consistente sui tempi di risposta è imputabile alla elevata variabilità dei dati raccolti.

Anche nel Task Switching le prestazioni appaiono influenzate dall'esposizione a un'illuminazione con forte concentrazione di radiazione blu. Il gruppo sperimentale infatti presenta una riduzione nell'effetto della Backward Inhibition durante la sessione test rispetto alla sessione base, mentre i soggetti appartenenti al gruppo di controllo non mostrano differenze tra le due sessioni.

Il dato più interessante che emerge in questo studio è che la riduzione di efficacia della Backward Inhibition non sia associata a un aumento dello Switch Cost.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/109.

Università Milano Bicocca, CRIET

CRIET (Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio) ha realizzato il software "City Public Lighting Profiler" per il progetto Lumière. Il software prevede come input alla base del processo d'analisi il censimento degli impianti comunali. Dopo aver acquisito alcune informazioni per la creazione di un'anagrafica del Comune, il software prevede l'inserimento da parte dell'utente di informazioni di sintesi relative a ciascun quadro elettrico che compone la rete di pubblica illuminazione. In particolare, i dati richiesti sono quelli contenuti nella scheda di sintesi della linea elettrica presentata all'interno delle Linee Guida Lumière. Il software esegue calcoli e confronti volti a:

1. ottenere una fotografia dello stato attuale degli impianti che possa essere comparata con le informazioni fornite dal gestore;
2. ottenere, sulla base del Piano della Luce, una valutazione circa:
 - gli interventi da eseguire per efficientare gli impianti;
 - gli investimenti da sostenere per la riqualificazione della rete;
 - le tipologie di finanziamento a disposizione per ottenere i fondi necessari per gli interventi;
 - i risparmi energetici ai quali è possibile pervenire.
3. verificare i possibili risparmi manutentivi ottenibili grazie a una riqualificazione degli impianti e una ridefinizione dei canoni di manutenzione.

Una seconda funzione del *City Public Lighting Profiler* è quella di calcolare i possibili risparmi energetici conseguibili dal Comune una volta realizzati gli interventi di efficientamento della rete di pubblica illuminazione. Il software, acquisite informazioni circa l'analisi territoriale, gli adeguamenti e gli interventi sui corpi illuminanti, elabora un Piano degli interventi da realizzare per riqualificare la rete di pubblica illuminazione. Allo stesso tempo, le informazioni acquisite consentono di stimare i costi delle operazioni di efficientamento che dovranno essere sostenute dal Comune, unitamente ai costi accessori derivanti dalla redazione del preliminare, dal bando di gara per l'affidamento dei lavori e dalle spese di finanziamento. Inoltre, il *City Public Lighting Profiler* fornisce all'utente un piano degli investimenti contenente informazioni relative alle diverse ipotesi di finanziamento delle attività che il Comune deve realizzare. Infatti, una volta definito il Piano degli interventi, diverse sono le possibili fonti di finanziamento attraverso le quali l'amministrazione locale può reperire le risorse necessarie a realizzare gli interventi progettati. Individuati gli interventi da realizzare, i costi da sostenere e la forma di finanziamento

dell'operazione, il *City Public Lighting Profiler* è in grado di eseguire un confronto tra la situazione pre e post intervento e, conseguentemente, può mostrare all'utente il risparmio di energia associato alla riqualificazione degli impianti comunali.

Una terza sezione completa questo nuovo software della famiglia *City Profiler*. Il programma, infatti, consente di effettuare una valutazione relativa ai risparmi manutentivi conseguibili grazie agli interventi di efficientamento della rete. La riduzione della spesa per la manutenzione dei punti luce deriva dal differenziale tra i costi sostenuti dall'amministrazione prima dell'intervento di riqualificazione e quelli a cui sarà necessario provvedere una volta terminato il processo di efficientamento.

Infine, il *City Public Lighting Profiler* è stato dotato di un database all'interno del quale confluiscono tutti i dati inseriti dalle amministrazioni comunali. Pertanto, è ipotizzabile che questo secondo tool della famiglia *City Profiler* possa costituire il presupposto per la realizzazione di un nuovo strumento utile a monitorare nel tempo la validità degli interventi di efficientamento della rete di pubblica illuminazione.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/110.

d. Tecnologie per l'industria del freddo

Università degli Studi di Roma, Dipartimento di Chimica

La collaborazione di ricerca ha avuto lo scopo di comprendere gli effetti di materiali particolari, quali polimeri, complessi metallici ed ibridi a base di complessi di metalli di transizione, sulla maturazione post-raccolta della frutta, ovvero al fine di bloccare le azioni dannose dell'etilene. Lo studio si è articolato in due fasi:

- *Fase I:* Diversi materiali potenzialmente assorbitori sono stati selezionati, preparati e testati tramite valutazioni qualitative come assorbitori di etilene;
- *Fase II:* Sulla base dei test preliminari condotti nella fase I, sono stati selezionati alcuni materiali. In questo caso la loro capacità di assorbitori di etilene è stata confrontata e valutata seguendo la variazione di colorazione della buccia del frutto, tramite rilevamenti colorimetrici. Gli studi sono stati condotti in triplo ed i risultati confrontati con un frutto di controllo.

I materiali utilizzati nella *Fase I* (valutazioni qualitative della maturazione di banane) sono stati: polimetilmetacrilato nano strutturato (PMMA); polifenilacetilene amorfo (PPA); polimetallaino contenente Pd(II) (Pd-DEBP); polimetallaino contenente Pt(II) (Pt-DEBP); nanoparticelle d'Ag funzionalizzate (AgDEA); complesso quadrato planare *trans*-Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA.

Di questi materiali, alcuni promettenti sono stati selezionati per la *Fase II* (rilevamenti colorimetrici sui frutti, in triplo, per valutare la maturazione di banane) confrontandoli con complessi di Pt(II) e Co(II). In particolare si riportano i risultati per i seguenti materiali: Pd-DEBP, Pt-DEBP, [Pd(PBu₃)₂Cl₂] in PPA, CoCl₂ in PPA.

Sia per la sperimentazione nella Fase I che nella Fase II sono stati utilizzati frutti commerciali. I frutti sono stati lasciati maturare naturalmente in presenza dei diversi materiali, al buio, a temperatura ed umidità ambiente. L'analisi colorimetrica della buccia è stata eseguita periodicamente, durante un periodo di 22 giorni, tramite un colorimetro Minolta CM-2600d. I risultati sono stati espressi attraverso le abbreviazioni del sistema CIELAB (L*, a*, b*) e riportando i valori come a*, b*, (a*b*) e come H° (Hue angle).

Dai primi studi qualitativi, condotti nelle condizioni testate nel nostro laboratorio, a temperatura ed umidità ambientali, è emerso che è presente un effetto di inibizione del processo di maturazione da parte di film di contenenti Pd(II) e Pt(II). In particolare, si dispongono in ordine di maturazione i vari campioni (dal frutto più maturo al meno maturo): bianco ~ PMMA > AgNPs > PPA ~ Pd-DEBP > Pt-DEBP > Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA.

Inoltre la consistenza dei frutti mantenuti in presenza di PPA ~ Pd-DEBP > Pt-DEBP > Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA è più solida rispetto al bianco. Rispetto a quest'ultimo si osserva un effetto di inibizione del processo di maturazione da parte di Pd(PBu₃)₂Cl₂ in PPA ed in misura minore di Pt-DEBP, che vengono selezionati per ulteriori test di confronto.

Dal successivo studio semi-quantitativo, realizzato nella Fase II mediante analisi colorimetrica è emerso che l'utilizzo di complessi contenenti siti metallici di Pd (II), Pt (II) e Co (II), consente un sostanziale assorbimento di etilene che si concretizza in una più lenta maturazione dei frutti, fino a 22 giorni rispetto al controllo.

In particolare, per quanto concerne il parametro a* è evidente l'effetto esercitato dai materiali a base di Pd(II), Pt(II) e Co(II) sull'evoluzione del colore: le banane mantenute in presenza di detti materiali, infatti, pur presentando nei primi tre giorni di conservazione a temperatura ambiente, valori di a* (comparsa del giallo) simili ai frutti del controllo, completavano il viraggio di colore con 4 giorni di ritardo, come si può osservare nel grafico in Figura 401.

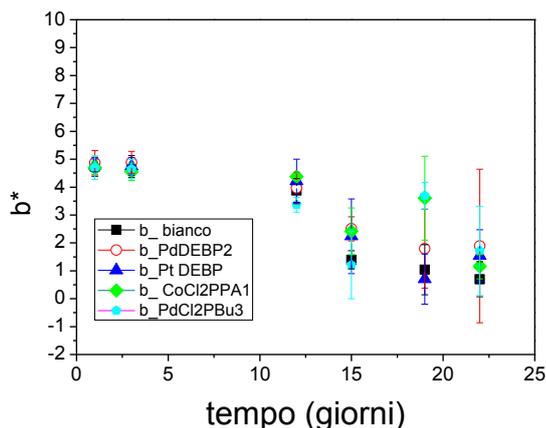


Figura 401. Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di a^* per il controllo (bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori. I simboli indicano il valor medio e le barre la relativa deviazione standard su misure colorimetriche effettuate in 3 diversi punti dello stesso frutto

L'azione assorbente esercitata dai materiali giustifica il rallentato sviluppo del colore nelle banane. In questi frutti, quindi, la percezione dell'ormone risultava diminuita dall'assorbimento da parte dei materiali, mentre i frutti del controllo, continuavano la normale evoluzione del colore. Questo spiega anche l'andamento dei valori di b^* riportato in Figura 402, dove al 15° giorno i frutti in presenza di assorbitori a base di Pd(II), Pt(II) e Co (II) mostrano valori di b^* maggiori del controllo, ancora più evidenti nei giorni successivi.

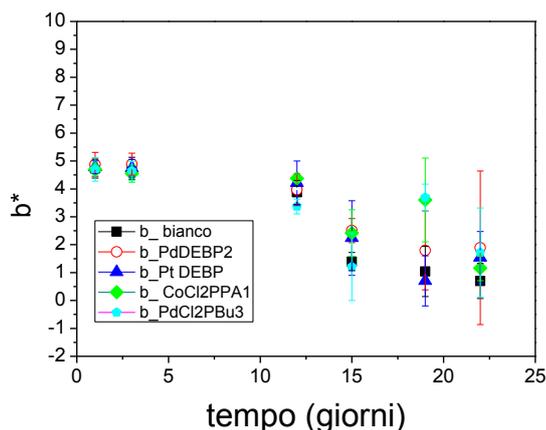


Figura 402. Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di b^* per il controllo (bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori

Anche dall'osservazione visiva, i campioni mantenuti in presenza dei film a base di polimeri e complessi organometallici sembrano aver subito un rallentamento nella maturazione, sebbene sui vari frutti vi siano delle macchie scure causate da urti e sollecitazioni meccaniche pregresse. Confrontando il bianco con i frutti mantenuti in presenza dei film di materiali assorbitori, si evidenzia un miglior mantenimento dei frutti conservati in presenza dei film a base di polimeri organometallici (Pd-DEBP e Pt-DEBP).

Ulteriori conferme vengono dall'analisi della variazione di H° (Hue angle) degli stessi frutti, riportata in Figura 403.

Una diminuzione del valore di Hue angle (H°) è associata con il passaggio del colore della buccia dal giallo al marrone. Dopo 12 giorni i frutti conservati con l'assorbitore a base di Pd (II) mostravano una decisa colorazione gialla mentre gli altri campioni, tra cui il controllo, tendevano al giallo intenso con punteggiatura nera (black spotting). Dopo 15 giorni l'effetto degli assorbitori si differenziava: le banane in presenza di complessi organometallici mostravano un minor decremento nei valori di H° rispetto al controllo e agli altri materiali testati.

In conclusione nelle condizioni testate nel nostro laboratorio, a temperatura ed umidità ambientali, i dati hanno mostrato la capacità di pochi milligrammi dei nostri materiali, in particolare dei polimeri organometallici Pt-DEBP ed in misura maggiore Pd-DEBP nel ritardare la maturazione delle banane, ponendo un serio presupposto riguardo ad una sicura ed affidabile applicazione di questi assorbitori dell'azione etilenica.

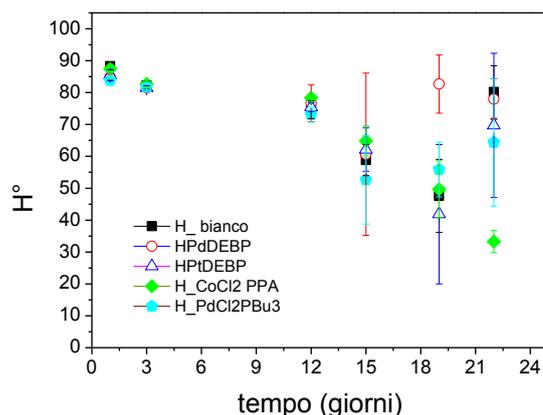


Figura 403. Variazione nel tempo del colore della buccia dei frutti, espresso in termini di H° per il controllo (bianco) e le banane in presenza dai vari assorbitori

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/106.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM)

Il gruppo di ricerca dell'Università Politecnica delle Marche ha condotto le analisi preliminari per verificare il raggiungimento di benefici di risparmio energetico derivante dall'uso di materiali in passaggio di fase, PCM nell'involucro delle celle frigorifere.

Il materiale a cambiamento di fase, a causa del passaggio di fase e quindi assorbimento e rilascio di calore latente, presenta maggiori difficoltà nella simulazione. Durante il passaggio di fase si ha un assorbimento o un rilascio di energia, dovuto alla rottura dei legami molecolari, che non sempre è inseribile nei comuni algoritmi e metodologie di calcolo. Obiettivo dell'analisi effettuata è stato quello di valutare l'inerzia termica apportata dall'applicazione di materiali a cambiamento di fase ad un pannello base quale componente di una cella frigorifera con il fine di dimostrare la validità di questa soluzione per incrementarne la capacità termica per la riduzione del carico termico derivante dall'esposizione all'ambiente esterno.

Sono state progettate ed eseguite varie campagne di test corredate di simulazioni numeriche per valutare i differenti comportamenti dei pannelli sviluppati in funzione delle zone climatiche e degli orientamenti (Verticale Nord, Sud, Est Ovest ed Orizzontale). L'analisi dei risultati ha confermato con variazioni fra PCM e PCM e con l'applicazione di spessori diversi, la bontà della soluzione al fine della riduzione dei consumi energetici (per i dettagli si rimanda al rapporto tecnico RdS/2013/101).

La fase sperimentale è stata imperniata sulla evidenziazione del contributo del PCM al risparmio energetico nell'esercizio di celle frigorifere esposte ai carichi termici ambientali esterni. Per perseguire questo obiettivo, sono state acquisite due celle frigorifere identiche delle quali una è stata implementata sulla superficie esterna orizzontale di copertura con uno strato di materiale in passaggio di fase. Le due celle sono state dotate di un sistema di monitoraggio dei parametri termici caratterizzanti il comportamento termodinamico delle stesse, mentre il rilievo dei parametri ambientali esterni è stato effettuato attraverso l'uso di una centralina climatica le cui caratteristiche, insieme con quelle del sistema di monitoraggio dei parametri caratterizzanti le celle verranno riportati più avanti. Il confronto tra le prestazioni energetiche delle due celle, sottoposte alle stesse condizioni ambientali esterne ha portato ad evidenziare il diverso comportamento, con il conseguente diverso consumo energetico.

Le celle sono state implementate con un sistema di monitoraggio ed esposte al clima esterno sul terrazzo del Laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università (Figura 404) per stressare le condizioni sperimentali. Sono state misurate: temperature interne alle celle a varie altezze per verificare eventuali stratificazioni dell'aria interna alla cella, temperature superficiali interne ed esterne dei pannelli di

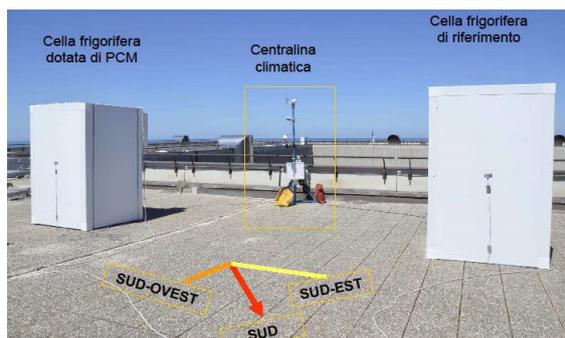


Figura 404. Setting sperimentale

tamponamento ed infine flussi termici entranti. Contemporaneamente, attraverso l'uso di una centralina climatica, sono stati registrati tutti i dati climatici che hanno influenzato l'evoluzione termica della cella.

In Figura 405 si riporta un grafico del flusso entrante nel quale si può evidenziare lo sfasamento operato dal PCM nella cella che lo utilizza (linea rossa) rispetto a quello entrante nella cella di riferimento (linea azzurra). La maggiore altezza dei picchi della linea rossa rispetto a quelli della linea blu è dovuta al sistema di packaging della paraffina (PCM) costituito da un contenitore metallico di alluminio il cui comportamento termico prevale su quello del PCM.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/2013/101.

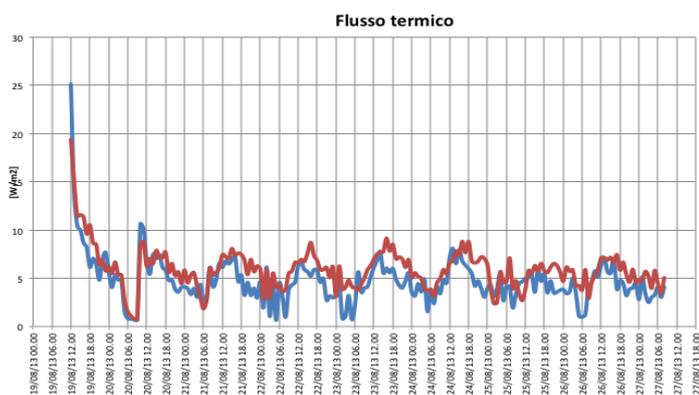


Figura 405. Sfasamento operato dal PCM nella cella che lo utilizza (linea rossa) rispetto a quello entrante nella cella di riferimento (linea azzurra)

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

La recente Direttiva 27/2012/CE rimarca il ruolo determinante dell'efficienza energetica nel settore del civile, riprendendo molti dei criteri presenti nella direttiva 31/2010/CE che obbliga gli Stati Membri a dotarsi di standard e strumenti in grado di assicurare e accelerare l'attuazione dei programmi per l'efficienza e il risparmio energetico e raggiungere l'obiettivo del Nearly Energy Zero Building (NEZB).

In particolare viene richiesto di determinare, nell'ambito delle destinazioni d'uso residenziale e non, gli edifici di riferimento nuovi ed esistenti, la definizione di nuovi standard di prestazione energetica degli edifici, la definizione degli edifici NEZB, la metodologia comparativa, per la verifica dell'efficacia degli standard utilizzati, e altri criteri mirati al miglioramento dell'efficienza energetica con particolare attenzione agli edifici della Pubblica Amministrazione (PA) nuovi e, in modo più mirato, a quelli esistenti.

Il quadro è molto complesso e si dovranno attivare una serie di studi per superare la parcellizzazione dei possibili interventi, assicurarne la razionalità e la convenienza economica, e mettere a punto modelli applicabili per le Pubbliche Amministrazioni. Per rendere efficaci e fattibili gli interventi individuati sarà indispensabile che si sviluppino modelli per agevolare e utilizzare da parte delle PA contratti di garanzia e ingaggiare operatori privati, in particolare le ESCo e istituti di credito congruenti con le Direttive Europee: 27/2012/CE e 31/2010/CE (Direttiva EPBD recast)²⁸ e la 2005/32/CE (Direttiva EuP) per la creazione di un quadro sull'ecodesign delle apparecchiature utilizzanti energia.

In tale senso l'efficienza energetica, intesa nel suo più ampio senso di riduzione del consumo di energia a parità di servizio e di uso razionale dell'energia, è uno strumento funzionale alla costruzione di un quadro organico con un orizzonte di medio e lungo periodo; la sua doppia natura legata ai miglioramenti tecnologici ma anche a comportamenti consapevoli e responsabili verso gli usi energetici la rendono lo strumento più efficace dal punto di vista della praticabilità tecnica, finanziaria e socio-economica. In questo ambito riveste una innovazione il fatto che anche per gli edifici vincolati si dovrà intervenire per rendere più efficienti gli impianti e formulare proposte che prevedano l'integrazione con le fonti rinnovabili.

L'impegno particolarmente intenso necessario per raggiungere tali obiettivi, per gli edifici delle PA, richiede efficaci politiche energetiche che da un lato facilitino lo sviluppo di tecnologie, processi, prodotti e servizi a ridotto consumo di energia e dall'altro- nello stesso tempo- permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività consistono nello studio, sviluppo e valutazione di strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica degli edifici del settore residenziale e non residenziale, finalizzate al contenimento dei consumi energetici e alla riduzione dei gas serra, con riferimento agli edifici della Pubblica Amministrazione (Centrale e Periferica). Le attività hanno tenuto conto degli impegni assunti dal nostro Paese nel Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica 2011 (PAEE) e gli adempimenti che le nuove Direttive UE impongono agli Stati Membri. In particolare la Direttiva 31/2010/CE chiede agli Stati Membri una serie di studi e verifiche per definire e dimostrare l'efficacia degli standard di prestazione energetica per il sistema edificio-impianto da adottare, il contributo da valutare per l'energia prodotta da fonte rinnovabile, la definizione dell'edificio a energia quasi zero e la messa a punto di un nuovo format per l'Attestato di Prestazione Energetica per gli edifici con le necessarie azioni di informazione al cittadino. Nella direttiva 27/2012/CE viene data particolare attenzione agli edifici del settore pubblico, residenziali e non residenziali, per i quali si chiedono una serie di dati tramite i quali poter sviluppare misure e standard di intervento accompagnati da una diagnosi energetica e da una sensibilizzazione e formazione del personale tecnico delle PA. Da tener presente che, per gli edifici pubblici, tali livelli di prestazione saranno obbligatori dal 1 gennaio 2019 mentre lo saranno dal 1 gennaio 2021 per tutti gli edifici privati e pubblici. Oltre a questo aspetto gli Stati Membri dovranno mettere in campo adeguate misure e provvedimenti per dare un forte impulso all'efficientamento energetico degli edifici del pubblico già dal 2014. Questo comporta, oltre che lo studio di

²⁸ Direttiva recepita in Italia con il Dlgs. 192/2005, successivamente modificato e integrato dal Dlgs. 311/2006 e dal DPR 59/2009.

particolari forme per il finanziamento degli interventi di efficientamento degli edifici, anche lo sviluppo di strumenti, per la valutazione degli indicatori di efficienza energetica, componenti, per migliorare le prestazioni dell'involucro e degli impianti, e servizi tecnologici integrati in grado, a parità e qualità di servizio reso, di offrire il risultato migliore tenendo presente il fattore costo/beneficio.

Nel Progetto si è sviluppata una metodologia comparativa cost-optimal, che ha dovuto far riferimento alle linee guida prodotte dalla Commissione UE, che ha richiesto la definizione di edifici di riferimento per il residenziale (villino, piccolo condominio e grande condominio) e non residenziale (uffici), la definizione di almeno 10 tipologie di intervento da valutare ed una serie di standard prestazionali su cui sviluppare le valutazioni richieste dalla metodologia. Dovendo prevedere anche la realizzazione di interventi per le PA, con l'utilizzo delle ESCo, sono state sviluppate tutta una serie di attività che hanno interessato anche la parte tecnico-amministrativa (contrattualistica, linee guida, ecc.) e quella per la conoscenza di strumenti e procedure, che le PA possono utilizzare, in modo particolare per il finanziamento tramite terzi.

In questo ambito una grande importanza è stata attribuita allo sviluppo di strumenti e modelli applicativi semplificati per la diagnosi energetica, per la certificazione energetica degli edifici, per il calcolo dell'EP in regime estivo e per la definizione di nuovi benchmark per le singole destinazioni d'uso, per l'accesso a finanziamenti europei e nazionali, per la sensibilizzazione dell'utenza sulla convenienza nell'applicazione di interventi per l'efficienza energetica e sull'applicazione di sistemi per la misura dell'efficacia degli interventi.

Lo svolgimento delle attività del progetto ha considerato, quindi, le nuove indicazioni delle direttive europee che hanno definito con una attenzione molto specifica lo sviluppo di azioni a supporto degli edifici della Pubblica Amministrazione che, oltre a rivestire il ruolo di esempio di eccellenza per l'efficienza energetica dei propri edifici, dovranno dotarsi di strumenti e modelli per utilizzare le opportunità finanziarie messe a disposizione dalla UE e da quelli nazionali e per le strategie da mettere in modo da favorire l'aggregazione della domanda.

Il progetto si articola in cinque obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

a.1 Sviluppo di una metodologia per la valutazione della rispondenza degli standard energetici nazionali, da applicare agli edifici di riferimento, secondo le linee guida della metodologia comparativa promossa dalla 2012/31/UE

La Direttiva 2010/31/UE, anche conosciuta come EPBD recast (*Recast della Energy Performance of Buildings Directive*), definisce i principi relativi al miglioramento della prestazione energetica degli edifici. La EPBD recast richiede agli Stati Membri che i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici siano definiti in un'ottica di raggiungimento dei livelli ottimali di costo. A tali fini, la Direttiva ha introdotto una metodologia di analisi comparativa con il proposito di determinare requisiti di riferimento per gli standard nazionali.

Il livello ottimale in funzione dei costi è definito come "il livello di prestazione energetica che conduce al costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio", dove il costo più basso è determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all'energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento e degli eventuali costi di smaltimento. Agli Stati Membri è demandata la determinazione della durata del ciclo di vita economico dell'intero edificio o degli elementi considerati nelle valutazioni.

Il 21 marzo 2012 la Commissione ha pubblicato il Regolamento delegato (UE) N. 244/2012 del 16 gennaio 2012, e a seguire, il 19 aprile 2012, le Linee guida (Orientamenti della Commissione) che lo accompagnano. Con questi provvedimenti è stato definito il quadro metodologico per la determinazione dei requisiti energetici ottimali degli edifici, dal punto di vista sia tecnico che economico. Detto quadro costituisce la base per le elaborazioni a cura degli Stati. Con l'utilizzo di questa metodologia, gli Stati identificano i requisiti minimi di prestazione energetica corrispondenti ai livelli di costo ottimali, per edifici nuovi e per edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni edili e impiantistiche, importanti e non. Gli Stati confrontano i risultati di questi calcoli con i corrispondenti requisiti minimi vigenti e riferiscono alla Commissione.

Il presente lavoro si colloca all'interno del suddetto contesto ed ha lo scopo di sviluppare una metodologia per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica.

ENEA ha collaborato con i tecnici del Politecnico di Torino nelle diverse fasi di messa a punto della metodologia. Si sono inoltre tenute una serie di riunioni specifiche con i funzionari della Commissione UE e della Soc. ECOFYS, incaricata dalla Commissione Europea di definire gli indirizzi e i criteri da seguire per la metodologia comparativa,

che si sono svolte a Bruxelles e a Roma e diversi incontri tecnici di approfondimento con alcuni operatori del settore.

Per l'applicazione della metodologia per il nuovo costruito e per l'esistente, è stato messo a punto uno strumento di calcolo in formato Excel *user friendly*, costituito da una serie di fogli collegati tra loro in grado, per ogni caso studio considerato, di fornire la migliore soluzione tecnologica in termini di costi/benefici finalizzata alla riduzione dei consumi energetici, per edifici di nuova costruzione e per edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione totale.

Il processo di ottimizzazione ha preso in considerazione i consumi annuali per riscaldamento, produzione ACS, raffrescamento ed illuminazione (nel caso di edifici non residenziali), nonché l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili (pompa di calore, solare termico per produzione ACS e fotovoltaico) ed i costi globali (di intervento, di manutenzione e di esercizio, i proventi della esportazione di energia elettrica e gli eventuali costi di smaltimento).

Il lavoro è stato strutturato in quattro fasi, come segue:

1. *Definizione di edifici di riferimento*: tre tipologie di edifici residenziali (monofamiliare, piccolo e grande condominio) e un edificio per uffici sono stati scelti per le zone climatiche italiane B ed E, per tre differenti periodi temporali ('46-'76, '77-'90, nuova costruzione) al fine di estendere la ricerca ad edifici rappresentativi del parco edilizio italiano per funzionalità, caratteristiche tipologiche e costruttive, e condizioni climatiche. La definizione delle caratteristiche tipologiche e costruttive degli edifici campione scelti si è basata su dati di letteratura, su indagini statistiche e sui risultati del progetto di ricerca europeo IEE-TABULA. La classificazione dei sistemi impiantistici è stata effettuata sulla base dei dati dell'indagine effettuata da CRESME per ENEA in funzione della tipologia di impianti di riscaldamento (tipo di alimentazione, sistema di emissione e sistema di regolazione della temperatura), mentre per gli impianti di climatizzazione estiva si è considerata la tipologia d'impianto e il sistema di regolazione.
2. *Messa a punto degli strumenti di valutazione del livello ottimale di costo degli interventi di risparmio energetico*: una valutazione sia energetica sia economica è stata effettuata considerando vari pacchetti di misure di efficienza energetica. La valutazione energetica è stata condotta mediante metodologia semplificata, in accordo con le specifiche tecniche UNI/TS 11300-1/4, con lo scopo di prevedere i consumi energetici globali per singolo edificio campione; la valutazione economica è stata condotta in accordo con la norma UNI EN 15459 al fine di prevedere il costo globale in un contesto di nuova costruzione o ristrutturazione edilizia totale. Per ognuna delle valutazioni sono stati predisposti idonei strumenti di calcolo, realizzati come fogli di calcolo Excel.
3. *Valutazione del livello ottimale di costo per alcuni edifici campione*: gli strumenti di calcolo definiti al punto 2 sono stati applicati agli edifici campione del punto 1 e per ogni tipologia edilizia è stato definito un pacchetto di interventi di risparmio energetico "ottimale", corrispondente al gruppo di interventi di risparmio energetico che se applicati condurrebbero al migliore rapporto costi economici/benefici energetici. Nell'ambito dell'attività è stata condotta un'analisi economica degli interventi di riqualificazione energetica e si è definito un quadro dei costi per singolo intervento, per la zona climatica E. Successivamente, i risultati ottenuti sono stati comparati con i valori prescrittivi contenuti nell'attuale legislazione energetica nazionale al fine di verificare se tali prescrizioni abbiano un reale beneficio economico, secondo quanto richiesto dalla Direttiva 2010/31/UE. Infine, è stata condotta un'analisi di sensibilità su scenari di tasso di sconto differente da utilizzare per il calcolo dei costi finanziari ottimali, in accordo con quanto richiesto dalle Linee Guida al Regolamento.
4. *Simulazione dinamica*: la ricerca dei livelli di prestazione ottimali è stata successivamente condotta attraverso l'utilizzo di un metodo di calcolo dei consumi energetici globali basato su un modello di simulazione termo-energetica dinamica per due dei casi studio già definiti al punto 1 (edificio residenziale multifamiliare esistente ed edificio per uffici). Per il calcolo dei consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento è stato utilizzato il software di simulazione EnergyPlus²⁹ con passo di tempo sub-orario (15 min) e sulla base di condizioni al contorno variabili su base oraria. Data la logica di simulazione eminentemente deterministica di un software di questo tipo e dato il tempo di calcolo per ogni singolo run di simulazione, la ricerca del livello di prestazione ottimale in funzione dei costi è stata condotta eseguendo la simulazione dinamica nelle condizioni di riferimento e in una serie di pacchetti di misure di efficientamento energetico (tra venti e trenta a seconda del caso studio) definiti caso per caso a seguito di una valutazione della fattibilità tecnica del singolo intervento di efficientamento energetico e dell'associazione di diversi interventi di riqualificazione energetica (pacchetti di misure), procedendo quindi a confrontare sul diagramma consumo globale-energia primaria i risultati. Analogamente a quanto effettuato al punto 3, è stata effettuata un'analisi di sensibilità in funzione dei parametri economici.

La metodologia sviluppata è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/2013/144.

²⁹ <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

a.2 Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici - Analisi dei consumi elettrici del parco edifici del Politecnico di Milano

Per lo sviluppo della metodologia si è fatto riferimento ad un caso concreto che è stato applicato nel complesso del Campus Bovisa del Politecnico di Milano. I dati scaricati dal sistema di lettura remota utilizzati per lo studio fanno riferimento a 64 x-meters installati in diversi quadri, contatori e/o cabine elettriche, riferiti a 25 edifici facenti capo al Campus Città Studi e a 16 edifici di pertinenza del Campus Bovisa. Le prime letture degli assorbimenti elettrici presenti nell'archivio del sistema si riferiscono all'autunno 2011 ma, per consistenza di numero e per stabilità di dato, al fine delle valutazioni riportate nel presente studio sono state utilizzate quelle disponibili a partire da gennaio 2012. ENEA ha effettuato una serie di incontri al Politecnico di Milano per la determinazione degli edifici e verificare l'installazione degli x-meters concordando le modalità di acquisizione dei dati, la procedura da seguire per la loro elaborazione e l'analisi dei dati acquisiti seguendo le fasi di elaborazione dei dati.

Il periodo utile considerato è terminato a fine giugno 2013. Ovviamente la progressiva installazione degli x-meters, le fasi di testing e riconfigurazione delle installazioni, nonché le disattivazioni e/o rotture accidentali degli strumenti, non sempre hanno consentito di disporre di dati omogeneamente sovrapponibili dal punto di vista temporale. In particolare, le letture del Campus Bovisa si sono dimostrate lacunose poiché, in buona parte, relative agli x-meters installati più di recente, e poiché, in taluni casi, facenti capo ad x-meters trascurati dal punto di vista manutentivo (letture interrotte non più ripristinate), con conseguente periodo temporale utile limitato a qualche mese. Con l'occasione del presente studio è stato sollevato il problema al fine di allocare delle risorse per il ripristino delle stazioni in tempi auspicabilmente rapidi.

La procedura di analisi ha comportato l'esportazione dei dati dal sistema, selezionandone la sorgente con cadenza oraria, e la trasposizione in fogli elettronici. Con la costruzione di apposite macro è stato possibile organizzarne la mole di dati secondo i desiderati periodi temporali, nonché generare grafici rappresentativi delle letture volute.

Dall'analisi preliminare dei dati scaricati dal sistema sono emerse non poche perplessità sulle corrette assegnazioni delle utenze (le distribuzioni elettriche del Politecnico sono alquanto complesse per modifiche ed integrazioni avvenute nel corso degli anni, con ben poche tracce documentali se non quelle segnalate dagli "addetti ai lavori"). Inoltre, tra le difficoltà riscontrate, di non poco conto è stata la denominazione fuorviante assegnata ad alcuni x-meters: da un lato poiché, in alcuni casi, riferita a numerazioni di edifici non più in uso attualmente (ad es. l'attuale edificio n.25 del Campus Città Studi con la precedente numerazione era il n.22, numero che ora corrisponde a quello che prima era l'edificio n.23, mentre quest'ultimo numero è ora assegnato all'edificio che un tempo era 16/A, etc.) e/o, dall'altro lato, poiché il numero di edificio richiamato nella denominazione dell'x-meter segue il criterio del luogo fisico in cui è presente il punto di lettura, il quale non sempre è riconducibile alle distribuzioni elettriche a servizio del medesimo edificio.

Tra gli aspetti connessi alle criticità emerse durante l'interpretazione degli andamenti temporali dei consumi, di fatto si è constatato che talune incongruenze erano solo apparenti, poiché riconducibili ad inaspettati assorbimenti energetici rilevati durante i periodi notturni e festivi (funzionamento notturno e/o festivo di pompe di circolazione e/o chillers e/o UTA, oltre alle note questioni legate all'illuminazione e a fancoil non sempre disattivati dall'utenza, che si traducono in "zoccoli" di consumo energetico).

Tale criticità riconduce al diverso peso dei benchmark reali rispetto a quelli nominali, cui generalmente si fa riferimento, e avvalga l'efficacia della ricerca svolta poiché, con ogni probabilità, situazioni analoghe fanno comunemente capo agli edifici in generale, ed in particolare a quelli della Pubblica Amministrazione.

Un'attenta, meticolosa e reiterata analisi comparativa dei dati è stata dunque effettuata, e supportata dalle informazioni ottenute grazie ad alcuni incontri congiunti con i tecnici AGIS (Area Gestione Infrastrutture e Servizi) e ATE (Area Tecnico Edilizia) del Politecnico, sulla base degli andamenti rilevabili per gli interi periodi di lettura e, in parallelo, focalizzando sulle letture di settimane-tipo rappresentative dei diversi periodi stagionali.

Per quest'ultima disaggregazione, il criterio generalmente adottato è stato quello di considerare una settimana del mese di gennaio, verosimilmente rappresentativa di consumi elettrici con possibili pertinenze connesse ai sistemi di riscaldamento, una settimana del mese di giugno, con analoghe pertinenze connesse ai sistemi di raffrescamento, una settimana della seconda metà di aprile ed una della prima metà di ottobre, allo scopo di eludere le perturbazioni connesse ai sistemi di riscaldamento (attivi nella città di Milano dal 15 ottobre al 15 aprile) e/o raffrescamento.

Nei casi di più letture facenti capo agli stessi edifici, inoltre, si è proceduto con verifiche incrociate, effettuando diverse opzioni di sovrapposizione o sottrazione delle serie di valori, per determinare i casi in cui taluni dati rilevati riconducono a sotto-letture di altri x-meters.

Gli esiti delle analisi effettuate sulle letture dei dati hanno consentito di individuare diverse tipologie di assorbimento, da quelle riconducibili ai convenzionali circuiti Luce + Forza Motrice, a quelle dovute alle pompe di circolazione degli impianti di distribuzione dei fluidi freddi e/o caldi, a quelle pertinenti la generazione frigorifera, la ventilazione (UTA) e l'utilizzo di sistemi di climatizzazione autonomi integrativi a quelli centralizzati.

Una seconda fase di elaborazione ha comportato, avvalendosi di una ulteriore macro generata con foglio elettronico, l'estrapolazione dei dati di consumo energetico su base mensile, distinti nelle tre fasce temporali cui sono soggette le tariffe F1-F2-F3.

L'analisi dei dati energetici, pesati sulle diverse superfici e/o volumi riconducibili alle destinazioni d'uso di pertinenza, ha consentito in alcuni casi di stimare e disaggregare ulteriormente quote di energia riconducibili a utenze specifiche (in particolare connesse agli assorbimenti per raffrescamento) e di calcolare i diversi benchmark di consumo specifico (per unità di superficie e/o di volume). Il quadro dei benchmark di consumo specifico ottenuti è organizzato in un apposito foglio elettronico in cui è possibile filtrare diverse categorie di confronto dei dati.

L'attività svolta ed i risultati delle analisi effettuate sono riportati nel rapporto RdS72013/151.

a.3 Analisi e raccolta dei dati di consumo dei centri sportivi, disponibili presso il CONI Servizi di Roma, e delle possibili attività di ottimizzazione delle piscine

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università di Roma "Sapienza" hanno riguardato un'indagine sui consumi e sugli interventi di risparmio energetico degli impianti natatori gestiti dal CONI Servizi di Roma. Nello studio sono state inoltre analizzate alcune piscine private, in diverse zone climatiche, per ricercare alcune relazioni tra zone, impianti, sistemi, dimensioni, metodologie di gestione e consumi.

ENEA ha svolto un compito di "policy" verso i responsabili del CONI al fine di avere la disponibilità di accesso ai dati e ai luoghi, e ha collaborato con il DIAEE nelle diverse fasi in cui si sono sviluppate le attività, in modo specifico per quanto riguarda la metodologia da utilizzare per le indagini e per le analisi e valutazione dei dati dei risultati acquisiti.

Nel corso della ricerca sono stati analizzati e valutati tutti gli interventi di risparmio energetico effettuati dal CONI Servizi sugli impianti di Roma (presso i centri sportivi Giulio Onesti e Foro Italico); tra i principali interventi di ottimizzazione troviamo i seguenti:

- installazione dei misuratori di calore e di elettricità sui principali circuiti;
- utilizzo delle vasche di compenso per evitare di sfiorare l'acqua in eccesso direttamente in fogna;
- impiego dei teli antievaporazione durante le ore di non utilizzo della piscina;
- installazione di scambiatori per il recupero del calore dalle pompe di calore (desurriscaldamento e condensazione) nel funzionamento estivo;
- installazione di pompe di calore reversibili da sfruttare in parallelo o alternativa alla caldaia a gas, anche per poter scegliere la fonte di energia al momento più conveniente per generare calore;
- impiego di caldaie in batteria, dotate di bruciatore modulante, per seguire il carico massimizzando il rendimento;
- altri interventi di minore importanza ma che, sommati, portano comunque un buon risparmio o migliorano la gestione permettendo altrettante iniziative di risparmio.

Deludente è la situazione di molti privati che, per sopportare i costi di gestione energetica molto elevati, spesso per incompetenza, si allontanano dai requisiti di norma ed igienici delle piscine gestendo gli impianti e le strutture in maniera errata.

Sono stati esaminati differenti interventi di risparmio e per ognuno sono stati indicati i dati di consumo particolari ed i relativi aspetti positivi e negativi.

Nel rapporto RdS/2013/140 per ogni punto analizzato si descrive come le condizioni al contorno vanno ad influire pesantemente sulle variabili di progetto; va sottolineato che gli impianti sono distribuiti su tutto il territorio nazionale in zone climatiche ben differenti. Si dimostra quanto sia essenziale considerare tutte le condizioni al contorno, anche ambientali, affinché un intervento di ottimizzazione porti dei benefici e non dei danni. Viene infine presentato un breve elenco dei migliori interventi di risparmio energetico oggi attuabili, alcuni valutati a consuntivo sulla base dell'esperienza fatta negli impianti CONI Servizi ed altri tecnicamente validi ed applicabili.

Le attività svolte consistono essenzialmente nei seguenti passi principali:

- indagine sugli impianti adatti ad essere presi come campione e ricerca dei siti,
- contatto con i gestori, presa visione dei dati di consumo ed eventuali misure sul campo,

- studio degli impianti e della relativa situazione tecnica e di gestione,
- analisi dei dati di consumo e valutazione delle eventuali azioni di risparmio intraprese,
- discussione dei risultati e delle scelte tecniche con i gestori,
- redazione della relazione e descrizione dei migliori interventi riscontrati o fattibili.

Il lavoro di ricerca ha riguardato l'indagine energetica effettuata su almeno una decina di impianti natatori; nell'ambito delle indagini fatte sul campo è stata valutata la validità degli interventi di risparmio energetico rilevati e sono stati calcolati i relativi indicatori di consumo.

La ricerca non può fornire standardizzazioni o indicazioni di previsione dei consumi a causa della grande quantità di variabili fondamentali che descrivono i sistemi. Le infinite possibilità di gestione di un impianto non consentono di generalizzare la progettazione in un campo particolarmente complesso come quello delle piscine.

In considerazione di ciò si ritiene che sarebbe opportuno svolgere un'attività finalizzata alla redazione di una rigida linea guida sul tema, non solo relativa alla progettazione, ma anche alla manutenzione, alla gestione ed al mantenimento delle condizioni di ottimizzazione in esercizio dell'impianto.

a.4 Definizione di parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi/benefici

Al fine di supportare, in ambito nazionale, il raggiungimento di alcuni degli obiettivi fissati dalla rifusione della Direttiva Europea sulla Prestazione Energetica degli Edifici (D. 2010/31/EU) e dalla sua trasposizione in Italia (decreto legge 63/2013), si è operato per definire una nuova procedura di ottimizzazione di supporto alla progettazione di edifici a energia quasi zero.

Questa procedura attua le specifiche riportate nella norma europea EN 15251 relative al dimensionamento ottimale dei sistemi passivi di un edificio. Questa norma propone che, durante il periodo estivo, in una prima fase, i sistemi passivi di un edificio siano dimensionati usando come riferimento il modello di comfort adattivo; ma, se la temperatura operativa all'interno degli ambienti non rispetta il criterio di comfort di lungo periodo scelto, è necessario installare un sistema di raffrescamento meccanico. In tal caso, i criteri progettuali di riferimento devono essere espressi in accordo con il modello di comfort di Fanger³⁰. Tuttavia, questo cambiamento di modello di comfort di riferimento può creare una discontinuità, poiché la migliore variante di edificio individuata usando il modello adattivo, può non coincidere con la migliore variante individuata con il modello di Fanger.

Nel rapporto RdS/2013/146 si descrive una nuova procedura di ottimizzazione specificamente creata per supportare la progettazione di edifici a energia quasi zero. Essa trae spunto dal criterio di dimensionamento proposto nell'EN 15251 e lo estende in modo da essere usato su tutto l'anno e con tutti i modelli di comfort ora in vigore. Essa è stata implementata usando un motore di ottimizzazione (GenOpt) che guida un motore di simulazione dinamica (EnergyPlus) attraverso le varianti di edificio che costituiscono lo spazio del problema. L'obiettivo è di individuare quelle varianti dell'edificio che minimizzano, in una prima fase, due indici di discomfort termico di lungo periodo stagionali, costruiti su un modello di comfort adattivo; tuttavia, se le condizioni interne non rispettano i limiti del modello adattivo di riferimento o non soddisfano le attese dell'analista/progettista, s'introduce un impianto meccanico nel concetto energetico dell'edificio e il discomfort termico è valutato rispetto al modello di comfort di Fanger.

Al fine di implementare un flusso di lavoro automatico è stato necessario introdurre nel software EnergyPlus, attraverso il modulo Energy Management System, il calcolo dei suddetti indicatori di discomfort di lungo periodo, attraverso la scrittura di alcuni codici nel linguaggio EnergyPlus Reference Language. Gli indici di discomfort di lungo periodo utilizzati in questa procedura hanno dimostrato, data una specificata variante di edificio, di fornire valutazioni del discomfort termico simili nonostante siano costruiti su diversi modelli di comfort. Pertanto, la procedura proposta implementa, ed anche estende, la procedura di progettazione suggerita dalla norma EN 15251 senza generare discontinuità rilevanti.

a.5 Analisi delle metodologie di diagnostica energetica in ambito illuminotecnico

La Direttiva 2002/91/CE o EPBD (Energy Performance of Building Directive), oggi sostituita dalla 2010/31/CE, è il primo strumento normativo europeo per il calcolo del fabbisogno energetico e dei requisiti di rendimento energetico per gli edifici di nuova costruzione e per gli edifici soggetti a ristrutturazioni di un certo livello. A livello nazionale, la certificazione delle prestazioni energetiche degli edifici è divenuta realtà con il DLgs 192/2005, in attuazione della direttiva 2002/91/CE, poi sostituito dal DLgs 311/2006, e con i relativi strumenti attuativi (D.P.R. n. 59 del 2009 e D. M. 26/6/2009) e normativi (norme UNI TS 11300).

³⁰ Fanger P.O. (1970) Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering Danish Technical Press.

Ad oggi la Certificazione Energetica degli edifici permane tuttavia uno strumento incompleto. Per quanto riguarda il calcolo dell'indice di efficienza degli impianti di illuminazione, la norma tecnica di riferimento, a livello europeo, è la UNI EN 15193, finalizzata al calcolo del LENI (Lighting Energy Numeric Indicator).

L'attività svolta all'interno della subtask a.5 dal Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università di Roma "Sapienza" è stata prevalentemente indirizzata all'edilizia scolastica e a quella per uffici. L'approccio utilizzato è stato di tipo teorico-numerico e sperimentale, ovvero fondato sull'impiego di tecniche di simulazione numerica dell'ambiente luminoso e da misure sperimentali. In particolare l'attività può essere schematicamente ricondotta ai seguenti punti salienti: analisi degli aspetti normativi, con particolare riferimento alla UNI EN 15193, analisi comparata, su basi teorico/simulative e sperimentali, delle prestazioni e dell'accuratezza delle metodologie esistenti, proposta per un nuovo algoritmo di calcolo.

ENEA ha collaborato con il DIAEE per indirizzare la ricerca sugli aspetti che maggiormente investono il tema della diagnostica in ambito illuminotecnico. In particolare ENEA ha affiancato il DIAEE nell'analisi della normativa vigente in modo da sviluppare le attività per poter rispondere nella maniera più coerente possibile con quanto viene richiesto, nella metodologia comparativa, per le valutazioni prestazionali del sistema di illuminazione artificiale (UNI EN 15193), che necessita di un aggiornamento per rendere le valutazioni più coerenti con la realtà.

Nell'analisi della UNI EN 15193 è risultato evidente, come sottolineato anche da altri studi, come la norma consideri l'illuminazione naturale come dovuta alla sola componente di radiazione diffusa dal cielo, quindi in condizioni standardizzate di cielo coperto e senza considerare l'orientamento geografico delle finestre verticali. Questa scelta, nata certamente dalla volontà di semplificare il calcolo, di fatto può risultare estremamente fuorviante, specialmente per le latitudini più basse e per quelle in cui la condizione di cielo coperto non è preponderante nel corso dell'anno. In tali condizioni, infatti, la presenza di radiazione diretta dovuta alla presenza del sole (cielo sereno) comporta un notevole innalzamento dei valori di illuminamento interno dei locali, ovviamente con un andamento orario legato all'orientamento del locale, che va ad incidere fortemente sulla necessità di attivare i sistemi di illuminazione artificiale. Va infine evidenziato come la norma metta in relazione l'irraggiamento ricevuto dai locali con la latitudine, proponendo quindi una valutazione estremamente semplificata anche dei valori di radiazione diffusa.

E' quindi evidente come considerare la sola radiazione diffusa quale unica fonte di illuminazione naturale porti da un lato ad un sovradimensionamento dei consumi energetici stimati per l'illuminazione artificiale e, dall'altro, ad un appiattimento di tali consumi, in quanto locali di egual dimensione ma con orientamento diverso risultano avere i medesimi consumi.

Al fine di valutare quanto i risultati ottenuti attraverso il calcolo sviluppato dalla UNI EN 15193 siano effettivamente coerenti con la realtà dei consumi energetici per l'illuminazione artificiale degli edifici si sono analizzate in modo approfondito le effettive condizioni di illuminamento interno riferibili alla luce naturale ottenibili con i principali software di calcolo commerciali, i cui risultati sono stati supportati da misure sperimentali su un modello in scala a geometria variabile; i risultati così ottenuti, riferiti a giorni tipici invernali e estivi, sono stati utilizzati per il calcolo dei consumi energetici e del LENI e confrontati con quanto ottenibile dalla norma precedentemente citata.

Il calcolo dell'illuminamento interno è schematicamente legato a due distinti elementi rappresentati da una parte dal dato di illuminamento esterno sulla finestra e dall'altro dalle caratteristiche geometriche/ottiche dell'ambiente: sulla base dei risultati ottenuti, la criticità della norma è risultata essere essenzialmente legata al primo degli elementi suddetti. Pertanto è stato sviluppato, come primo approccio, un metodo di calcolo, basato sull'utilizzo di dati di radiazione solare medi facilmente disponibili, della tipologia TMY (Typical Meteorological Year), che consente di calcolare facilmente un LENI più aderente ai valori reali riscontrati e simulati per le tipologie ambientali analizzate.

Dettagli sull'attività svolta con i relativi risultati sono contenuti nel rapporto RdS/2013/142.

a.6 Tool informatico semplificato per le diagnosi energetiche degli edifici pubblici (scuole e uffici) e manuale di istruzioni

L'obiettivo dell'attività è la realizzazione di un software con interfaccia grafica che risponda all'esigenza - sempre più strategica a livello territoriale e nazionale - di diffondere la pratica degli audit energetici degli edifici e verificare le possibilità di contenimento degli usi energetici tramite opportuni interventi di riqualificazione. A differenza della certificazione energetica, la procedura di diagnosi risulta infatti più accurata, in quanto tiene conto delle effettive condizioni di utilizzo dei locali e degli impianti e i fabbisogni stimati dei vari vettori energetici sono confrontati con le reali fatturazioni energetiche a carico dell'utenza. Il software è dedicato ad edilizia residenziale, uffici e scuole, con riferimento alla climatizzazione invernale tramite impianti ad acqua, produzione di acqua calda

sanitaria, illuminazione ed altri usi elettrici. Il software è denominato SEAS, acronimo di Software Energetico per Audit Semplificati (o Simplified Energy Auditing Software). La sua versione 1.0, costituita da una sequenza di fogli di calcolo, è stata realizzata nell'ambito del precedente accordo di collaborazione tra Università di Pisa ed ENEA, (Rapporto RdS/2012/110).

Nella presente annualità ENEA ha collaborato con il Dipartimento Energia dell'Università di Pisa per la messa a punto del SW, nei vari step della sua definizione e validazione. ENEA ha seguito lo sviluppo del SEAS per verificarne la funzionalità ed ha contribuito alle verifiche del tool su tre casi studio.

La versione 2.0 di SEAS è stata elaborata eseguendo:

- dal punto di vista informatico
 - il porting del software in ambiente JAVA,
 - l'ottimizzazione della sua struttura e degli algoritmi di calcolo,
 - la progettazione e realizzazione del database tramite MySQL,
 - un'interfaccia grafica user-friendly,
 - il manuale d'uso del software.
- dal punto di vista tecnico-energetico
 - l'aggiornamento delle procedure di calcolo delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto,
 - l'adattamento di tutte le routine influenzate dalla destinazione d'uso alle opzioni caratteristiche degli edifici residenziali, uffici e scuole,
 - l'inserimento della modalità multi-zona (esempio: utenze diverse e impianto centralizzato),
 - un trattamento più approfondito dei profili di presenza nei locali e di utilizzo degli impianti termici e dell'illuminazione,
 - un nuovo test case, basato sull'audit energetico di un edificio universitario.

In particolare, l'aggiornamento è stato suddiviso nelle seguenti tematiche: i) requisiti generali delle diagnosi energetiche degli edifici; ii) risparmi energetici conseguibili tramite l'utilizzo di sistemi di automazione e controllo; iii) livelli ottimali di costo per i requisiti di prestazione energetica; iv) incentivi statali per gli interventi di efficientamento energetico e per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Funzionalità di SEAS 2.0

SEAS svolge il calcolo dei fabbisogni dei vettori energetici per i servizi di riscaldamento (esclusi gli impianti aereaulici) e produzione di acqua calda sanitaria e dell'energia elettrica per illuminazione ed altre utenze. I sistemi che utilizzano fonti rinnovabili implementati sono: pannelli solari termici, moduli fotovoltaici, pompe di calore, generatori di calore a biomassa. È possibile effettuare calcoli multi-zona (esempio: diverse utenze e impianto centralizzato) e multi-generatore. Un'ulteriore routine permette di svolgere un'analisi costi-benefici di possibili interventi di retrofit energetico proposti dall'auditor.

È stato realizzato un manuale d'uso, che descrive le logiche di zonizzazione dell'edificio e tutte le schede di inserimento dei dati e dei risultati, separate in quattro macrosezioni: i) anagrafica e contesto geografico; ii) profili di utilizzo e involucro; iii) impianto di riscaldamento e produzione dell'acqua calda sanitaria; iv) fatturazioni energetiche e confronti coi fabbisogni calcolati. La routine di analisi costi-benefici degli interventi di riqualificazione energetica è illustrata nella sezione finale del manuale utente.

Utilizzando SEAS, sono state svolte tre diagnosi energetiche di edifici adibiti a ciascuna delle destinazioni d'uso considerate, incluse le simulazioni energetiche ed economiche di interventi di efficientamento. Questi tre audit, i cui dati sono salvati e caricabili dal software, sono descritti nel manuale e costituiscono utili esempi applicativi per gli utenti.

Rispetto a SEAS 1.0, oltre alle principali modifiche già evidenziate, si segnalano i seguenti aggiornamenti:

- il caricamento dei comuni relativi alla sola provincia selezionata e l'associazione automatica alla zona geografica per la correzione delle temperature esterne;
- il calcolo automatico dei fattori di ombreggiamento;
- l'aggiunta dei cassonetti nella routine dei componenti vetrati;
- l'aggiunta dei ponti termici puntuali;
- l'eliminazione del calcolo semplificato della capacità termica areica;
- la possibilità di inserire i sottosistemi impiantistici di distribuzione, accumulo, solare termico, generatori e fotovoltaico e le fatturazioni energetiche sia a livello di singola zona, sia sull'edificio somma delle zone;
- l'eliminazione del calcolo semplificato delle perdite di distribuzione per gli usi non residenziali;
- l'eliminazione del calcolo semplificato delle perdite di generazione per i generatori di calore a biomassa;

- l'aggiunta di alcuni vettori per la generazione di energia termica.

Validazione del software tramite test case

Per verificare il funzionamento del software e la correttezza delle formule inserite e delle metodologie adottate, sono stati inseriti e archiviati i dati di tre casi studio, riferiti a diagnosi energetiche effettuate su edifici a destinazione d'uso, rispettivamente, residenziale, uffici e scuole.

- **TEST CASE 1: Edificio residenziale domestico** - L'edificio analizzato è una villetta di due piani, inserita in un complesso bifamiliare costruito negli anni Ottanta e situato nella campagna di Camaione (LU), in zona climatica D.
- **TEST CASE 2: Edificio adibito ad aule didattiche** - In questo caso si è scelto un edificio d'epoca, di pregio storico, di proprietà dell'Università di Pisa, adibito prevalentemente ad uso didattico (aule).
- **TEST CASE 3: Edificio adibito ad uffici** - È stato analizzato un palazzo storico, anch'esso di proprietà dell'Università di Pisa, ubicato nel centro storico di Pisa. Dei cinque piani dell'edificio, ne sono stati simulati tre, ossia soltanto quelli adibiti ad uso ufficio.

In tutti e 3 i test case, sono state ipotizzate e simulate opportune misure di efficientamento energetico. Attraverso la routine che effettua l'analisi costi-benefici è stata verificata la fattibilità economica degli interventi, in termini di flussi di cassa netti e tempi di ritorno (semplici ed attualizzati).

Il software SEAS 2.0 si è dimostrato idoneo a stimare con sufficiente accuratezza i flussi energetici termici ed elettrici in edifici ad uso residenziale, uffici e scuole, serviti da impianti termici idronici. Di conseguenza, l'applicativo è in grado di valutare i risparmi conseguibili per mezzo di interventi di riqualificazione energetica, inclusa l'analisi dell'investimento economico. La procedura di calcolo è aggiornata alle più recenti normative tecniche del settore, con integrazioni e correzioni necessarie per adattare nel migliore dei modi i risultati alla reale gestione dei locali effettuata dall'utenza. L'interfaccia grafica *user-friendly* consente un'intuitiva conduzione della simulazione da parte dell'auditor. La possibilità di suddividere l'edificio in zone funzionali, ciascuna con le sue caratteristiche tecniche e di utilizzo, amplia notevolmente - rispetto a SEAS 1.0 - il numero di configurazioni reali simulabili. Come prassi per ogni nuovo applicativo, il software necessita di un periodo di monitoraggio e aggiornamento, anche in considerazione di eventuali difficoltà nell'applicazione della procedura proposta - sia in termini di raccolta dati sia di compilazione delle schede di input - da parte degli auditor.

L'attività è documentata e dettagliata nel rapporto Rds/2013/143.

a.7 Il sistema informativo sui consumi energetici degli edifici pubblici. Dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici

Il sistema informativo sui consumi energetici degli edifici pubblici, elaborato dal CRESME, è composto da un database sui consumi energetici annuali (elettrici e termici) e sulle caratteristiche degli edifici scolastici (scuole pubbliche dell'infanzia, primarie, secondarie di primo grado e secondarie di secondo grado) e da un analogo data base per gli edifici pubblici ad uso ufficio.

ENEA ha collaborato con il CRESME per la definizione del campione statistico su cui svolgere le indagini e ha partecipato alle fasi di controllo e validazione del campione dando le indicazioni sul formato del sistema operativo.

- ***Il database sui consumi energetici delle scuole pubbliche***

Il database sui consumi energetici delle scuole pubbliche è costruito attraverso un'indagine campionaria (su oltre 2.300 scuole) che ha coinvolto 110 amministrazioni provinciali e oltre 550 amministrazioni comunali. Il campione è stato selezionato mediante cosiddetto campionamento a Network a partire dal Database del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) sulle scuole italiane che ha definito la popolazione di riferimento al 2012 (48.275 scuole pubbliche, 7,9 milioni di alunni). In una prima fase è stato realizzato un campionamento casuale semplice stratificato senza reinserimento (su zona climatica e ripartizione). Quindi, alle scuole selezionate è stato sottoposto, mediante indagine CATI (Computer Assisted Telephone Interviewing) un questionario sulle caratteristiche degli edifici scolastici (volumetrie, superfici, tipologia degli impianti di climatizzazione, presenza e caratteristiche degli impianti per le fonti rinnovabili, combustibile utilizzato, ecc.). In una seconda fase sono stati contattati gli enti pubblici incaricati della gestione economica delle scuole (tutte le Province per quanto riguarda le scuole superiori, i rispettivi Comuni per le altre scuole selezionate). Tutte le scuole per cui gli enti rispondenti hanno fornito indicazioni sui consumi sono state incluse nel campione finale (campionamento a Network). Il campione così realizzato è stato quindi sottoposto a diverse fasi di controllo, validazione e omogeneizzazione (assegnazione codici meccanografici, omogeneizzazione unità di misura,

individuazione e trattamento outliers, trattamento dati mancanti). Infine, le stime dei consumi totali e dei consumi energetici medi in kWh (per superficie e per alunno), così come i rispettivi intervalli di confidenza per ogni dominio di interesse (ripartizione territoriale, zona climatica, classe dimensionale degli alunni), sono state ottenute attraverso stimatori di rapporto (ratio estimator). Il sistema informativo è stato quindi organizzato e pensato per una facile e rapida consultazione e per una analisi immediata. E' composto da due distinti database:

1. Il primo raccoglie i dati dettagliati per le oltre 2.300 scuole che costituiscono il campione finale e i valori medi stimati per area territoriale, zona climatica e classe dimensionale. Le variabili messe a disposizione sono: denominazione; localizzazione (georeferenziazione, indirizzo, comune, regione, provincia, ripartizione, zona climatica); codice meccanografico; numero alunni; gradi giorno del comune; volume e superficie complessiva dell'edificio; consumi elettrici e termici annui (kWh e euro ove disponibili); consumi per alunno; consumi specifici (kWh/m²); tipologia degli impianti di riscaldamento e raffreddamento; combustibile utilizzato (metano, gasolio, teleriscaldamento, ecc.); tipologia edilizia dell'edificio (cemento armato, muratura, prefabbricato, ecc.).
2. Il secondo è il data base del MIUR con aggiunti, per ogni scuola italiana, i consumi energetici annui elettrici e termici e i consumi per alunno, rilevati (per le scuole del campione) o stimati (per tutte le altre).

▪ *Il database sui consumi energetici degli edifici pubblici ad uso ufficio*

Il database relativo agli edifici pubblici ad uso ufficio è stato realizzato in modo analogo, con una sostanziale differenza: una più complessa operazione di individuazione degli uffici pubblici, non esistendo alcun archivio in considerazione della frammentazione dei soggetti titolari (amministrazioni centrali e territoriali, enti locali, ecc.) e della relativa indisponibilità di banche dati (anche per singolo ente pubblico) concernenti il patrimonio immobiliare in uso e/o in possesso. L'esito ottenuto, pertanto è frutto di una serie di elaborazioni condotte su più banche dati: censimento delle Istituzioni, archivi catastali, banche dati sulle utenze telefoniche. L'indagine campionaria, finalizzata a conoscere i consumi energetici specifici, è stata condotta su un campione di oltre 600 edifici pubblici.

Il sistema informativo è messo a disposizione nei formati e nelle modalità richieste, ad esempio in formato database di Access 2010 (con eventuale maschera di rapporto) o in file Excel 2010 (con annesso eventuale foglio di rapporto, ad esempio, tabelle pivot).

L'attività svolta e i risultati delle indagini condotte sono descritti nel rapporto RdS/2013/141.

a.8 Metodologia per i bilanci energetici territoriali e la pianificazione delle politiche energetiche: uno strumento per la verifica del raggiungimento degli obiettivi strategici nazionali e comunitari

L'attività ha per oggetto lo sviluppo di una nuova metodologia per la redazione di bilanci energetici territoriali. La metodologia proposta è organizzata intorno ad uno schema rappresentativo caratterizzato da un elevato livello di dettaglio, ormai reso necessario per gli adempimenti relativi agli obiettivi 2020 (EU Climate and energy package). All'interno di tale schema è stato integrato uno specifico componente dedicato al terziario pubblico, che mette in evidenza le grandezze coinvolte negli interventi di risparmio energetico attuati nel settore, con particolare riferimento al comparto immobiliare pubblico.

Nello sviluppo della metodologia sono stati implementati alcuni elementi derivanti dalle attività svolte dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, in collaborazione con ENEA, nell'ambito del Progetto Strategico RENERFOR (Iniziative di cooperazione per lo sviluppo delle fonti di energia rinnovabili - bosco ed acqua - nelle Alpi Occidentali, il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra) promosso all'interno del Programma di cooperazione transfrontaliera tra Italia e Francia Interreg ALCOTRA (Alpi Latine Cooperazione Transfrontaliera) 2007-2013. Tali attività hanno riguardato una fase di definizione preliminare della metodologia e una prima applicazione sperimentale ad alcuni territori dell'euro-regione ALPMED coinvolti nel progetto RENERFOR.

L'attività di ricerca svolta consta di tre parti riguardanti lo sviluppo metodologico, l'inserimento della componente aggiuntiva terziario pubblico e un test di applicazione.

ENEA ha curato il coordinamento complessivo delle attività oggetto della collaborazione, svolgendo anche una funzione di raccordo tra i vari soggetti che operano in attività inerenti la definizione dei bilanci energetici e della pianificazione energetica ed ambientale. La fase iniziale del lavoro ha richiesto inoltre di raccordare i principali risultati di alcuni progetti e attività su: metodologie per la redazione di bilanci energetici, raccolte dati, elaborazione di scenari e fattori di utilizzo ed emissione. ENEA ha curato la fase di approfondimento normativo a livello comunitario e nazionale relativamente agli obiettivi al 2020 per la riduzione dei consumi di energia primaria, la produzione di energia da rinnovabili e la riduzione delle emissioni di CO₂ (Direttiva 2009/28/CE, Pacchetto Clima

della Commissione Europea, Direttiva su Efficienza Energetica 2012/27/EU, Decreto “Burden Sharing”) e relativamente agli obiettivi di efficienza energetica nel settore pubblico (Direttiva 2010/31/EU). Ha inoltre analizzato in dettaglio il Regolamento Europeo N.1099/2008 verificando la congruità degli schemi elaborati e la corretta applicazione dei criteri di calcolo per il raggiungimento degli obiettivi, così come richiesto dalla 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. ENEA ha operato in sinergia con il Politecnico di Torino nella fase dedicata allo sviluppo della metodologia, contribuendo alla definizione ed alla verifica degli schemi di flusso energetico, dall'energia primaria al consumo finale attraverso le varie trasformazioni. Nella seconda fase dell'attività, ENEA ha contribuito alla definizione del nuovo componente dedicato al Terziario Pubblico, verificando gli schemi elaborati e nella terza fase ha collaborato alla messa a punto del test per l'applicazione della metodologia LEB (Local Energy Balance).

La prima parte del lavoro è dedicata allo sviluppo della metodologia LEB per la costruzione e l'analisi di bilanci energetici territoriali. Il sistema energetico del territorio in esame è rappresentato attraverso uno schema fisico dei flussi energetici e delle fasi di produzione, trasformazione, reti di trasporto e distribuzione, consumi dell'energia. Tutte le fonti e i vettori energetici sono singolarmente individuati da specifici flussi e nodi. Ciascun flusso è tracciato in termini di contenuto di energia rinnovabile e di emissioni di CO₂ originata dal suo processo di generazione (limitatamente ai processi di combustione). I consumi relativi ai principali aggregati sono evidenziati da specifici contatori.

Rispetto alle metodologie convenzionali, il LEB offre una serie di elementi innovativi quali una rappresentazione più esaustiva degli aspetti inerenti le energie rinnovabili, la cogenerazione e la trigenerazione, la produzione distribuita e gli scambi con le reti, il teleriscaldamento e il teleraffrescamento, l'immissione di biometano nelle reti di gas naturale. Inoltre, l'impostazione di calcolo consente analisi pluriennali combinando dati storici e scenari previsionali, con relative verifiche del posizionamento rispetto agli obiettivi 2020 (riduzione dei consumi complessivi di energia, quota di energia da fonti rinnovabili per usi finali, emissioni di gas serra).

La seconda parte riguarda l'inserimento, all'interno dello schema della metodologia LEB, di un nuovo componente in grado di tracciare gli usi energetici che avvengono in relazione alle attività e agli edifici del terziario pubblico. L'integrazione effettuata permette di analizzare sia i flussi di vettori energetici che le conversioni di energia locali, introducendo un livello di analisi ulteriore rispetto a quello dei consumi finali di energia individuato nelle metodologie convenzionali.

In particolare, tale approccio consente di distinguere gli effetti delle azioni di efficienza e risparmio energetico. Ad esempio è possibile studiare separatamente le variazioni della richiesta energetica diretta degli edifici (determinate da interventi sulle strutture e/o sugli utilizzatori), distinguendole dall'andamento dei consumi di vettori energetici (dove agiscono anche gli interventi sul parco impianti approvvigionamento energetico). Analogamente per quanto riguarda le variazioni nell'approvvigionamento di energia (ad esempio teleriscaldamento, teleraffrescamento) o l'inserimento di fonti rinnovabili (ad esempio solare, biomasse, geotermia).

La terza parte infine è relativa alla realizzazione di un test di applicazione della metodologia LEB (integrata con il nuovo componente) ad un contesto territoriale reale. Scopo del test è l'individuazione di criticità e potenzialità connesse con l'utilizzo della metodologia proposta. Tra queste, l'attenzione è focalizzata in particolare ai disallineamenti tra la base dati attuale, strutturata in funzione della metodologia convenzionale, e le ulteriori esigenze informative determinate dallo schema LEB.

Su indicazioni di ENEA, il test è stato condotto in riferimento al territorio della Regione Piemonte, utilizzando le informazioni pubblicate nei Bilanci Energetici Regionali (BER). L'esito del test indica che una parte significativa dei dati è già estrapolabile dai BER. Un pieno utilizzo della metodologia LEB (e la conseguente valorizzazione delle sue potenzialità) richiede ulteriori integrazioni della base informativa attuale, peraltro necessarie per il riscontro degli obiettivi 2020. Ulteriori approfondimenti relativi alle effettive disponibilità di dati energetici di dettaglio potranno essere oggetto di eventuali lavori successivi.

L'attività svolta è dettagliata nel rapporto RdS/2013/145.

a.9 Redesign di edifici a energia netta zero e valutazione del contributo dell'Embodied Energy, per la definizione dell'edificio NZEB. Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana

L'attività, svolta nel quadro dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento dell'Energia, Ingegneria dell'Informazione e Metodi matematici (DEIM) dell'Università di Palermo, si articola in due fasi: la prima relativa all'analisi degli edifici ad energia netta zero con un particolare approfondimento su un caso-studio, la Leaf House; la seconda relativa all'analisi dei dati statistici disponibili in letteratura sul patrimonio edilizio scolastico siciliano.

ENEA, nella sezione del redesign ha fornito le indicazioni necessarie per gli interventi sull'involucro edilizio, finalizzati ad ottenere un involucro ad altissime prestazioni energetiche ed ha verificato la congruenza tra i criteri definiti in ambito IEA (Task 40 / ECB Annex 52 "Towards net zero energy solar buildings") e quelli nazionali; ha svolto inoltre delle analisi per le soluzioni impiantistiche e di involucro per il target NZEB e fornito dati per la stima dei costi. Nella seconda fase del lavoro ENEA ha effettuato una prima indagine sul parco edifici ad uso scuola e fornito le indicazioni per lo svolgimento dell'analisi statistica degli edifici.

Nella prima fase dello studio è stata completata l'analisi dell'edificio investigato, la Leaf House; in particolare è stato predisposto un completo redesign dell'edificio ipotizzando anche la sostituzione di alcuni elementi di involucro. Sono stati redatti accurati bilanci di energia primaria dell'edificio su base annuale, mensile e giornaliera, per valutare se l'edificio conseguiva il target di NZEB, è stato progettato un completo redesign, e si è valutata l'incidenza dell'energia incorporata sulle prestazioni energetiche dell'edificio. Una prima evidenza dello studio connessa alla valutazione dell'energia incorporata può essere sintetizzata nel fatto che, per edifici caratterizzati da elevate prestazioni energetiche, fasi del ciclo di vita diverse dalla fase d'uso possono essere non trascurabili nel caso di edifici NZEB.

In dettaglio, l'attività di approfondimento sull'edificio oggetto di studio è stata svolta nell'ambito dei filoni di ricerca di seguito elencati:

- individuazione del gap tra l'edificio reale e il target di NZEB attraverso la valutazione dei bilanci annuali, mensili e giornalieri di energia convertita in primaria dell'edificio indagato;
- redesign completo dell'edificio reale utilizzando soluzioni impiantistiche e di involucro per raggiungere il target di NZEB;
- analisi dell'energia incorporata dell'intero edificio;
- stima dei costi di redesign.

Tramite la verifica dei bilanci suddetti è stato possibile stimare la differenza tra energia (convertita in primaria) generata e consumata nel corso del periodo di analisi. Si è rilevato altresì l'importanza di utilizzare la conversione in energia primaria rispetto alla definizione in termini di bilanci di energia finale.

Il lavoro di redesign dell'edificio campione, iniziato nelle annualità precedenti, è stato notevolmente dettagliato, ipotizzando un ampio range di soluzioni possibili, quali la modifica di componenti di impianto, il compendio di ipotesi di gestione dell'impianto e la modifica dei componenti di involucro, nell'ottica dello sviluppo di modelli utili alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente. È stata infine fornita una stima dei costi relativi agli interventi di redesign proposti.

È stata successivamente analizzata la consistenza e l'epoca di costruzione degli edifici scolastici a livello regionale e provinciale. Nel rapporto RdS/2013/272 sono descritte le caratteristiche termofisiche e strutturali tipiche degli elementi di involucro degli edifici scolastici siciliani di ogni ordine di studio (nido, materna, media e superiore) e le tipologie edilizie presenti su tutto il territorio regionale.

Le analisi statistiche riguardano le principali caratteristiche tipologiche, termofisiche e metriche desunte dai dati ottenuti nella fase di indagine. Sono stati altresì commentati i dati statistici riguardanti gli edifici in muratura e in calcestruzzo armato (c.a.) ed è effettuata un'analisi dettagliata in riferimento al livello di risoluzione dei dati, disaggregandoli per grado di istruzione, per ambiti territoriali e anno di costruzione.

Nel rapporto sono illustrati, per ognuna delle categorie analizzate e relativamente ai diversi ambiti territoriali e tipologici definiti, i dati raccolti. Tutti i dati riportati provengono essenzialmente da dati bibliografici e limitatamente alla provincia di Agrigento da dati di campo.

In conclusione l'analisi del caso studio di un NZEB italiano, sviluppata tramite la creazione di modelli dinamici, dimostra che l'oramai prossima realizzazione di nuovi edifici ad energia netta zero necessita di un forte processo di integrazione tra "tool" progettuali attualmente impiegati con scarsa interazione tra di loro. Un NZEB è infatti un "oggetto" complesso la cui progettazione va affrontata con un approccio interdisciplinare e con lo sviluppo di piattaforme informatiche di integrazione di modelli già esistenti che, singolarmente, non sono in grado di rispondere efficacemente alle nuove necessità progettuali indotte dalla realizzazione di edifici nei quali i consumi energetici dovranno essere equivalenti alla produzione.

Per quanto riguarda la seconda parte dello studio, seppur con riferimento a dati in larga parte statistici, si è evidenziato il rilevante potenziale di risparmio energetico connesso a potenziali interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico scolastico

Le attività svolte, con i relativi risultati, sono descritte nel rapporto RdS/2013/272.

a.10 Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici

Nell'ambito di questa subtask ENEA ha prodotto un documento in vengono descritte in maniera sintetica, obiettivi e procedure di diagnosi energetiche finalizzate alla riqualificazione energetica degli edifici della Pubblica Amministrazione. I diversi temi, non esaustivi delle tante problematiche connesse con l'efficienza energetica, sono trattati con un linguaggio semplice per agevolare la lettura anche al personale non propriamente esperto della materia.

Accanto ai riferimenti normativi, viene introdotto il concetto di diagnosi energetica con le varie fasi che ne caratterizzano lo sviluppo; successivamente sono stati evidenziati i principali obiettivi e le differenze tra diagnosi e certificazione energetica. La Tabella 88 riporta un quadro di sintesi delle più comuni problematiche relative all'edificio e agli impianti installati e i possibili interventi correttivi.

Tabella 88. Sistema edificio-impianto: problematiche e possibili interventi da applicare

		PROBLEMATICHE	POSSIBILI INTERVENTI DI ENERGY SAVING
EDIFICIO		Assenza di isolamento o isolamento insufficiente	Isolamento delle superfici opache
		Infissi a vetro singolo	Sostituzione degli infissi o dei soli componenti vetrati
		Esposizione solare sfavorevole alla climatizzazione estiva	Utilizzo di schermature
		Elevata altezza dei locali climatizzati	Utilizzo di controsoffittature
IMPIANTI	IMPIANTO TERMICO	Rivestimento isolante insufficiente per tubazioni e collettori	Rinforzo o rifacimento del sistema isolante
		Eccessiva temperatura dei prodotti di combustione al camino	Adozione di sistemi di recupero del calore sensibile dei fumi
		Impianto di combustione sovradimensionato rispetto alla potenza del generatore	Sostituzione dei bruciatori poco efficienti
		Rendimento termico ridotto	Sostituzione del combustibile
		Generatori in numero limitato e di potenza sovradimensionata	Sostituzione generatori per numero, tipo, potenza, rendimento
	ACS	Assenza di un sistema di regolazione automatica della temp. Di mandata dell'acs o inadeguata taratura dello stesso	Adozione di efficienti sistemi di regolazione automatica della temperatura di mandata
		Insufficiente isolamento del serbatoio e delle tubazioni	Revisione dell'isolamento del serbatoio e delle tubazioni
		Insufficiente capacità del serbatoio di accumulo	Installazione di un altro serbatoio di accumulo
	DISTRIBUZIONE	Insufficiente rivestimento isolante	Revisione del rivestimento isolante di tutte le reti
	SISTEMI DI REGOLAZIONE E CONTROLLO	Insufficiente controllo a livello locale	Adozione di dispositivi di regolazione sui corpi scaldanti (sensori di controllo, valvole termostatiche, controller sui ventilatori) Adozione di dispositivi di regolazione sulla distribuzione (valvole a due vie, valvole a tre vie)
		Insufficiente controllo e regolazione a livello di centrale termica	Adozione di sistemi di regolazione sui gruppi di generazione e distribuzione in centrale termica (controlli "in cascata" dei generatori, sonde climatiche, sistemi a inverter, pompe di circolazione a giri variabili)
	CONDIZIONAMENTO	Dissipazione di un'eccessiva quantità di energia termica con l'estrazione dell'aria	Installazione di sistemi di recupero aria-aria per il riutilizzo dell'energia termica perduta con l'aria espulsa
		Funzionamento al massimo carico anche in orari di mancata utilizzazione dei locali	Applicazione di timer e di motori a doppia polarità per il comando dei ventilatori nelle zone a occupazione prevedibile
		Squilibrio tra condizioni ambiente raggiunte in zone servite dallo stesso circuito	Zonizzazione dell'alimentazione dei circuiti che servono aree con caratteristiche diverse

		Problematiche	Possibili interventi di energy saving
IMPIANTI	ILLUMINAZIONE	Elevato fabbisogno energetico	Apparecchi di illuminazione ad alto rendimento
			Alimentazione elettronica (lampade fluorescenti)
			Lampade a maggior efficienza luminosa
			Sistemi di controllo <ul style="list-style-type: none"> • presenza/assenza • daylight • regolazione flusso luminoso
	ASCENSORI	Elevati consumi in stand -by	Sistemi di spegnimento luci ausiliarie e ventilazione di cabina quando l'ascensore non è utilizzato
			Impiego di led per tutti i sistemi di illuminazione e segnalazione
Elevati consumi dei motori idraulici		<ul style="list-style-type: none"> • valvole elettroniche (no resistenze riscaldamento olio e minore necessità di raffreddamento olio) • motore ad alta efficienza a comando della pompa idraulica • inverter vvvf - azionamenti che consentono di variare tensione e frequenza di alimentazione della pompa elettrica del circuito idraulico • soft start (riduce la $i_{avviamento}$ della pompa elettrica del circuito idraulico) 	
Elevati consumi dei motori elettrici	<ul style="list-style-type: none"> • motori ad alta efficienza • inverter vvvf • sistemi di rigenerazione dell'energia elettrica 		

Successivamente sono stati analizzati due esempi applicativi di diagnosi energetiche condotte su edifici pubblici a carattere storico architettonico: un complesso edilizio sede di un istituto universitario europeo a Fiesole (Badia Fiesolana) e la sede del Ministero dello Sviluppo Economico a Roma.

Si tratta in entrambi i casi di diagnosi relative ad immobili complessi sia per la composizione stratigrafica dell'involucro (opaco e trasparente) che per i sistemi impiantistici a servizio di utenze tra loro differenziate.

Nel caso della Badia Fiesolana oltre ad un impegno rilevante dovuto ad operazioni di rilievo in situ e reperimento dati di sistemi impiantistici distinti a servizio di diversi blocchi edilizi si sono dovute calcolare le caratteristiche termofisiche dei componenti l'involucro non disponibili da elaborati tecnici preesistenti e relative a stratigrafie articolate, diversificate in funzione di epoche successive di realizzazione. I risultati delle elaborazioni numeriche hanno consentito di approntare un quadro finale esaustivo di tutta la contabilità energetica, dei flussi di energia in ingresso e uscita dagli impianti e la definizione degli indicatori energetici più significativi. Questa diagnosi è stata effettuata utilizzando un software che eseguendo un bilancio energetico dell'edificio con ripartizione dei consumi in usi finali, consente di valutare i benefici energetici derivanti da diversi interventi ipotizzati tesi al contenimento dei consumi energetici.

La diagnosi relativa alla sede del Ministero dello Sviluppo Economico ha riguardato l'analisi e proposte per la riqualificazione dell'involucro edilizio e valutazioni in merito a ipotesi di sostituzione dei sistemi impiantistici. In questo caso specifico in sede di diagnosi sono stati effettuati monitoraggi ed analisi dei consumi elettrici, suddivisi nei vari usi (illuminazione, ascensori, climatizzazione estiva, apparecchiature, etc.) e analisi dei consumi termici al fine di proporre interventi di efficientamento energetico complessivo del sistema edificio-impianti. L'analisi dettagliata dei consumi è stata finalizzata alla quantificazione dei consumi, divisi per reparto per poter individuare fonti, quantità e cause di consumo.

Data le caratteristiche di pregio ed i vincoli imposti al manufatto non sono state proposte ipotesi di intervento sulla parte opaca dell'involucro, mentre sono state avanzati suggerimenti inerenti l'ottimizzazione dei componenti trasparenti in previsione di sostituzione dei serramenti. Da uno studio del comportamento dell'utenza (scarsamente sensibilizzata verso l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche) si è suggerito di prevedere azioni di informazione e responsabilizzazione degli utenti volte ad un uso consapevole dei diversi sistemi impiantistici.

Le attività sono dettagliate nel rapporto RdS/2013/147.

a.11 Realizzazione di un sistema esperto per amministratori di PA finalizzato alla diagnosi energetica degli edifici

La ricerca, condotta nel quadro dell'accordo di collaborazione con CTI, ha riguardato la realizzazione di un sistema esperto mirato all'autodiagnosi energetica degli edifici da parte degli amministratori della PA. Tale sistema è stato

sviluppato sulla base di un approccio di calcolo semplificato che richiede in ingresso un limitato numero di dati di input, generalmente a disposizione anche di utenti non dotati di un ampio bagaglio di conoscenze tecniche.

ENEA ha svolto un'attività mirata alla verifica del sistema esperto, definito in diversi moduli, che consentono di poter effettuare una prima valutazione degli interventi di efficienza energetica, e contribuito alla messa a punto della procedura da utilizzare tenendo conto che il sistema deve essere di facile utilizzo e flessibile alle diverse esigenze dei tecnici della PA.

Con il sistema esperto di autodiagnosi energetica degli edifici è possibile dunque determinare il fabbisogno di calcolo di:

- energia termica del fabbricato per la climatizzazione invernale;
- energia primaria per la climatizzazione invernale.

La procedura ha l'obiettivo di essere elastica ed adattabile all'utenza. Segue in larga misura la struttura di calcolo della specifica tecnica UNI/TS 11300 (parti 1 e 2), adottando le metodologie semplificate in esse contenute. Fa inoltre riferimento a ulteriori metodologie rapide messe a punto dal CTI relative all'utilizzo di energie rinnovabili, alla generazione per la climatizzazione invernale e alla produzione di acqua calda sanitaria.

Il "sistema esperto", realizzato con il software Microsoft Excel e corredato da un manuale, ha lo scopo di promuovere il rinnovamento dei fabbricati (o dei relativi elementi edilizi) e degli impianti di climatizzazione invernale guidandone le scelte tecnico/impiantistiche e agevolando la capacità dell'utente nel valutare l'efficacia dei diversi interventi di risparmio energetico innescabili con le azioni di recupero dell'edificio o di parti di esso.

Il sistema si articola in più moduli: "dati generali e profilo di utenza", "superfici disperdenti opache", "superfici disperdenti trasparenti", "ponti termici", "impianti tecnici". Dopo aver compilato a cascata tutti i blocchi (operazione per la quale l'Amministratore potrebbe ricorrere all'aiuto di un proprio tecnico) è possibile procedere, attraverso una interfaccia semplificata di utilizzo intuitivo, con la valutazione dei principali interventi finalizzati a migliorare le prestazioni energetiche del sistema fabbricato-impianto simulandone l'applicazione. Sono valutabili non solamente le singole azioni, ma anche possibili interventi integrati su più sistemi, in maniera da evidenziare eventuali conflitti o sinergie.

In particolare, viene fornita all'utente l'opportunità di valutare le prestazioni energetiche dell'edificio di interesse in forma particolarmente semplificata allineando, in automatico, le prestazioni energetiche di calcolo anche sulla base dei reali consumi energetici (consumo di combustibile) ricavabili dalle bollette energetiche.

Il foglio di calcolo non consente di realizzare un calcolo preciso; fornisce tuttavia dei validi indicatori riassuntivi circa le possibilità di buona riuscita di eventuali interventi di riqualificazione edilizia.

Tra le principali opportunità concesse dal sistema vi è la valutazione dell'effetto in termini energetici di diversi tipi di interventi quali:

- diversa regolazione e controllo degli impianti;
- sostituzione del generatore di calore a combustibili fossili (con diverse scelte);
- installazione di una pompa di calore (di diversi tipi, compresa quella geotermica);
- installazione di collettori solari termici;
- installazione di collettori solari fotovoltaici;
- installazione di un cogeneratore;
- incremento del livello di isolamento termico delle pareti verticali e orizzontali;
- incremento del livello di isolamento termico del tetto;
- sostituzione delle superfici trasparenti e/o dei serramenti.

La procedura di analisi è facilitata anche grazie all'ausilio di messaggi e note, tali indicazioni hanno la funzione di assistere l'utente nelle varie scelte consentendo, tra l'altro, la reale comprensione del significato relativo ai parametri in ingresso.

Le analisi introdotte, consentono di acquisire consapevolezza sulle opportunità energetiche e consistono alternativamente in:

- un'analisi rapida che prevede la scelta di una delle soluzioni già predefinite di riqualificazione (pacchetti);
- un'analisi dettagliata che prevede l'individuazione di interventi singoli di riqualificazione.

In entrambi i casi si possono valutare graficamente le implicazioni energetiche e ambientali in essere insieme agli effetti delle scelte ed in riferimento ai dati iniziali normalizzati.

L'applicazione sviluppata costituisce un primo passo propedeutico all'esecuzione di un'autodiagnosi, in quanto indica le fasi e i principali dati che dovranno essere raccolti dall'utente anche per simulazioni successive maggiormente dettagliate.

L'attività è descritta nel rapporto RdS/2013/148, nel quale sono presentati inoltre i risultati di due diversi esempi applicativi.

b. Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni

b.1 Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici: linee guida per la stesura di contratti di garanzia (rendimento energetico) con le PA

Gli Energy Performance Contract (EPC) sono un modello di contratto innovativo fortemente voluto dalla Comunità Europea per il grande potenziale che propongono. Si basano su un principio molto importante per la Pubblica Amministrazione: realizzare riqualificazioni degli impianti tecnologici energivori senza dover sostenere direttamente l'investimento né dover variare i costi di gestione.

Anche in Italia la legislazione ha lentamente acquisito questi nuovi meccanismi ed alcune pubbliche amministrazioni hanno agito da apripista in esperienze di gestione del patrimonio edilizio e impiantistico che prevedono forme nuove di remunerazione e di condivisione dei rischi legate alle prestazioni energetiche.

Da un punto di vista tecnico, diverse problematiche vanno approfondite in merito alla definizione degli obiettivi di risparmio e qualità del servizio specie in relazione alla misura di questi e alla loro verifica.

Lo sviluppo di una contrattualistica "premiata" sul tema energetico ha avuto ed ha una sua importante fattispecie nei contratti "Global Service". Il modello di acquisizione di servizi con la suddetta formula, per la molteplicità delle prestazioni richieste (relative ad aree tipologiche diverse) sotto una responsabilità unica sul risultato in capo all'assuntore, rientra a pieno titolo nella tipologia di un contratto misto di servizi, forniture e lavori.

Tra le prime esperienze italiane, principalmente svolte sotto forma di contratti di Global Service, occorre citare quelle delle Province di Genova e Treviso e del Politecnico di Milano. Da quest'ultima esperienza vengono tratti alcuni elementi cardine per definire delle linee guida per le procedure di gara e di gestione dei contratti, in particolar modo in riferimento alle problematiche della misura e verifica dei risultati e dell'applicazione di meccanismi premiali o penalizzanti.

Viene anche enfatizzata l'esperienza internazionale delle associazioni di ESCO in merito alle problematiche di misura e verifica, per delineare delle procedure standardizzate da seguire in una articolata casistica.

Inoltre, si descrive una struttura tipo di un piano di Misura & Verifica (M&V). In particolare si è enfatizzato come uno degli scopi principali di un piano di Misura & Verifica è quello di ridurre il rischio a un livello accettabile, in funzione delle priorità e delle preferenze del committente. Nei contratti di prestazione energetica, i rischi sono ripartiti tra la società di servizi energetici (ESCO) e il proprietario. L'allocazione del rischio è realizzata attraverso strategie di M&V accuratamente calibrate.

Le indicazioni ricavate dalle analisi condotte nel quadro del presente subtask ha portato all'elaborazione di "Linee guida per la definizione e la valutazione degli interventi di riqualificazione energetica in un contratto di Global Service/EPC" i cui contenuti, sono riportati estesamente nel rapporto RdS/2013/139.

b.2 Indagine conoscitiva sulla diffusione e applicazione del finanziamento tramite terzi (FTT) e dei contratti a prestazione energetica garantita (EPC) negli edifici della Pubblica Amministrazione

Sia la Direttiva 2006/32/CE che la più recente Direttiva 2012/27/UE assegnano un ruolo fondamentale alla Pubblica Amministrazione che con i propri comportamenti deve fungere da esempio verso il cittadino e le imprese, allo stesso tempo deve sviluppare un mercato per interventi di efficienza energetica, che in seguito potrà estendersi a tutto il settore immobiliare. La PA è responsabile della gestione dei propri immobili tra i quali gli uffici pubblici (e.g. per i comuni il municipio, le scuole inferiori e medie, eventuali strutture sportive), l'illuminazione pubblica e semaforica, le infrastrutture di servizio (raccolta e trattamento rifiuti, acquedotti) e i trasporti. La conoscenza dei vari aspetti del patrimonio pubblico e in particolare dei servizi offerti risulta quindi indispensabile per predisporre i bilanci energetici, procedere all'analisi, proporre delle soluzioni, seguire le scelte e misurare i risultati.

La situazione economica obbliga a raggiungere quest'obiettivo utilizzando strumenti innovativi di finanziamento. L'obiettivo del presente lavoro è quello di comprendere il livello di diffusione e applicazione del finanziamento tramite terzi (FTT) e dei contratti a prestazioni energetiche garantite (EPC) nella PA italiana, e il loro contributo per promuovere la riqualificazione energetica degli edifici della stessa.

La ricerca è stata eseguita ricorrendo a un'indagine ad ampio spettro su un campione significativo di Amministrazioni (Regioni, Università, Enti Locali), sottoponendo ai soggetti che si è ritenuto essere più indicati a

rispondere (e.g. dirigenti, responsabili di posizioni organizzative, energy manager, responsabili della manutenzione) un questionario da compilare prevalentemente tramite intervista telefonica.

Con tale procedura si è costruito un panorama conoscitivo del livello di diffusione del modello finanziario tramite terzi e dei contratti a prestazioni energetiche garantite; parallelamente il riferimento ad alcune esperienze significative ha permesso anche di redigere delle linee guida di supporto alla PA.

Grazie ai numerosi contatti telefonici avuti, è stato possibile ottenere un quadro ampio della complessità delle strutture responsabili della gestione energetica nelle amministrazioni, della trasversalità di ruoli e funzioni sul tema dell'energia.

Sono emersi, seppur in maniera non preponderante, casi di esperienze positive di applicazione del finanziamento tramite terzi e dei contratti a garanzia delle prestazioni energetiche. I risultati positivi sono stati ottenuti principalmente grazie all'intraprendenza e alla volontà di singoli soggetti più che a procedure strutturate, e quindi la loro replicabilità non è garantibile. Da questo punto di vista delle linee guida, come quelle predisposte nell'ambito di questo lavoro, possono aiutare, ma è richiesta la disponibilità delle amministrazioni pubbliche a dedicare tempo e risorse allo scopo.

Sono emerse le notevoli difficoltà riscontrate dagli energy manager, in molti casi poco influenti nelle decisioni inerenti alla gestione energetica degli edifici. La mancanza diffusa di un sistema di gestione dell'energia, sul modello di quello previsto dalla norma ISO 50001, è senza dubbio un fattore di debolezza della Pubblica Amministrazione.

La realtà dei fatti evidenzia come le scelte strategiche sulla gestione energetica del patrimonio immobiliare e sulla stipula dei relativi contratti vengano molto spesso prese dall'Ufficio Patrimonio, il quale però non risulta strutturato per affrontare queste tematiche, non possedendo il *know-how* richiesto.

L'analisi ha confermato un altro problema di molti Enti locali, quello dalla carenza di risorse finanziarie unito alla mancanza di personale specializzato da poter dedicare alla gestione energetica dei propri immobili. Da questo punto di vista si conferma la necessità di sviluppare al massimo il finanziamento tramite terzi per interventi di riqualificazione energetica della pubblica amministrazione. Affinché ciò possa avvenire è necessario creare le condizioni al contorno che consentono di impiantare un contratto a prestazioni garantite e a trovare investitori privati disposti a prestare il capitale necessario.

Una nota criticità in questo senso è quella della carenza di dati. Non è pensabile una corretta gestione degli edifici senza un adeguato supporto di misurazioni, dati completi e organizzati. Il tema sarà più facilmente affrontabile con l'introduzione di contatori elettronici anche per il gas oltre che per l'elettricità, ma richiederà sempre uno sforzo non trascurabile. Un primo passo potrebbe essere far evolvere i contratti Global service inserendo in essi l'obbligo di creazione o implementazione di un catasto con gli aspetti energetici sia delle strutture che dei consumi. Va sottolineato come, in assenza di dati affidabili e puntuali sui consumi (ossia non solo riferiti ai consumi globali), è impossibile determinare in modo preciso i risparmi conseguibili e, in seguito, un sistema di monitoraggio che ne misuri l'entità effettiva. Senza queste basi non può esserci una garanzia delle prestazioni e ciò rende difficile ricorrere all'FTT.

Fra le Amministrazioni pubbliche locali intervistate, è risultato che alcuni interventi di riqualificazione energetica sono stati realizzati nel corso degli anni, utilizzando risorse e finanziamenti differenti a seconda delle realtà. Ciò dimostra che il finanziamento tramite terzi è un'opzione concreta per la PA, con percorsi differenti in grado di adattarsi alle esigenze dei singoli enti. Molti enti, però, sono ancora in una fase iniziale della gestione dei propri edifici. È dunque necessario assorbire le esperienze delle *best practice*, e ricavare delle indicazioni per le successive fasi contrattuali.

Come stimolo per il policy maker, è fondamentale un'attività strutturata di comunicazione e divulgazione dei risultati e delle problematiche gestionali per la diffusione delle buone pratiche. Potrebbe essere utile pensare a una struttura dedicata per la raccolta dei dati provenienti da varie realtà, la preparazione dei documenti e la diffusione degli stessi. È un'attività che può essere avviata immediatamente perché ci sono varie esperienze positive da diffondere e replicare, non tanto per gli aspetti tecnici, quanto per le scelte organizzative e procedurali che le hanno rese positive.

Come spunto per ricerche successive si segnala l'opportunità di un'indagine approfondita sui modelli di business già impiegati e innovativi che possano consentire alla PA e al mondo del credito di promuovere al massimo l'impiego del finanziamento tramite terzi.

Per maggiori dettagli sull'argomento si rimanda al rapporto RdS/2013/273.

b.3 Le linee guida per l'utilizzo del finanziamento tramite terzi nella P.A.

Una prima versione della "Guida per le amministrazioni ai metodi pratici per il risparmio energetico negli edifici pubblici", commissionata dal Land dell'Assia e redatta dall'Agenzia per l'Energia di Berlino e da uno studio legale di Francoforte e Berlino, è stata pubblicata nel 1998, dando un contributo considerevole a nuovi modelli contrattuali, fornendo norme e principi molto dettagliati che possono essere utilizzati per sviluppare tali concetti e applicarli nel nostro Paese.

Da allora molti cambiamenti sono intervenuti con un impatto consistente sull'efficienza energetica. La Commissione Europea, in particolare, ha sostenuto finanziariamente molti studi e progetti per lo sviluppo di programmi di intervento basati sulla contrattualistica prestazionale, prima tramite il programma SAVE e infine con il programma Intelligent Energy Europe (IEE).

L'Agenzia Europea per la Competitività e l'Innovazione (EACI) pubblica e aggiorna regolarmente una biblioteca virtuale³¹ di tutti i progetti finanziati dalla Commissione ritenuti più interessanti, che consente di scaricare rapporti e altri documenti inerenti a linee-guida, manuali, schemi contrattuali sulla gestione dell'energia a livello regionale e locale.

Sicuramente imponente e approfondita è la documentazione prodotta nell'ambito del progetto "Eurocontract" prodotta dall'Agenzia per l'Energia di Graz (Austria) e dall'Agenzia per l'Energia di Berlino, con cui tra l'altro, ha collaborato anche la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE) e i cui vari documenti sono liberamente disponibili in rete.

Con questo lavoro si vuole cercare di descrivere e sistematizzare alcune esperienze realizzate e tracciare un percorso che le Amministrazioni Pubbliche, e i Comuni in particolare, possano utilizzare per riqualificare gli edifici di loro proprietà e ridurre i costi di mantenimento.

Nel documento RdS/2013/150 si riporta una panoramica, anche storica, dello sviluppo contrattuale in Italia, soffermandosi poi sulle nuove opzioni contrattuali: i Contratti di Prestazione Energetica (EPC) e il Finanziamento Tramite Terzi (FTT). Vengono descritte le due modalità più diffuse dei Contratti prestazionali: il Contratto a Cessione Globale Limitata e il Contratto a Risparmio Condiviso. Si affrontano le problematiche legate alla esternalizzazione dei servizi (teoria dell'Agenzia) e alle modalità per trasformare i rischi correlati in opportunità per le Amministrazioni pubbliche; si delineano gli aspetti giuridici e amministrativi legati all'inquadramento contrattuale con le ESCO, il superamento dei vincoli dettati dal "patto di stabilità" e gli aspetti correlati al finanziamento degli interventi di riqualificazione energetica. È descritto in dettaglio lo svolgimento di una "Procedura Ristretta" per l'aggiudicazione di un Contratto di Prestazione Energetica illustrandone puntualmente le fasi, le attività basilari e i tempi necessari. Si illustrano sinteticamente alcune esperienze recenti in linea con quanto indicato nella guida ed infine si riportano alcune *lesson learnt* che fungano da supporto nelle scelte delle amministrazioni. Completano il Manuale alcuni allegati che riportano alcuni importanti elementi contrattuali: la determinazione dei Risparmi e dell'ammontare del Canone a le procedure di Monitoraggio, Verifica e Reporting delle Prestazioni.

Come più volte segnalato, la preparazione, lo sviluppo e l'attivazione di Contratti EPC con Garanzia di Risultato, presuppone da una parte un forte *commitment* politico e d'altra parte una notevole esperienza e capacità di gestire un processo contrattuale non ancora consolidato a livello amministrativo.

Inoltre per garantire una reale indipendenza, le Amministrazioni necessitano di un minimo di risorse per predisporre le diagnosi energetiche iniziali e per strutturare la complessa documentazione di gara. Anche se questi costi saranno ripagati nel corso degli anni con i risparmi economici che si otterranno, molte Amministrazioni, vuoi per mancanza di risorse, vuoi per volontà politica, vuoi per altri motivi contingenti, preferiscono non avventurarsi su una strada che è ancora irta di rischi.

Per di più, se da una parte la lobby dei fornitori tradizionali di servizi energetici non è ancora disposta, in Italia, a rinunciare agli ampi vantaggi che i tradizionali contratti energia consentono, d'altro canto le nuove ESCO non sono ancora sufficientemente capitalizzate e solide per potersi impegnare a offrire investimenti consistenti.

Da questo punto di vista è necessario promuovere l'evoluzione del settore del credito (banche, fondi di investimento, etc.) verso la predisposizione di modelli e processi mirati a supportare i contratti EPC e l'FTT. Uno strumento di policy che potrebbe essere d'aiuto è quello dei fondi di garanzia, ma molto si può ottenere ricorrendo ai programmi della Banca europea degli Investimenti (BEI) già disponibili e utilizzati finora da poche amministrazioni.

³¹ <http://www.iee-library.eu>

Un'alternativa percorribile può essere quella di ricorrere ai "Contratti Energia Plus", ma con l'accortezza di esigere la separazione contabile nella fornitura del combustibile. Certamente i risparmi offerti potranno essere inferiori rispetto ad una negoziazione basata su una conoscenza indipendente del proprio stock edilizio e impiantistico, ma se i contratti sono negoziati con saggezza e lungimiranza, possono allenare le Amministrazioni al fondamentale compito del monitoraggio e della verifica puntuale dei consumi reali dei propri edifici e degli impianti in generale, con la prospettiva, al successivo rinnovo contrattuale, di trovarsi pronte ad affrontare schemi contrattuali più progrediti.

Comunque le prospettive stanno mutando e grazie anche all'esperienza maturata da molti Enti e Agenzie per l'Energia nell'ambito di co-operazioni a livello europeo, nuove tecniche contrattuali si stanno diffondendo nel nostro Paese, quale preludio a pratiche contrattuali migliori e più trasparenti.

b.4 Aspetti normativi del contratto EPC e dei suoi elementi di garanzia per la Pubblica Amministrazione

La ricerca è stata indirizzata secondo quanto previsto dalla direttiva 2012/27/UE sul tema della contrattualistica con garanzia della prestazione energetica, e mira a definire una proposta per un nuovo assetto contrattuale per la massimizzazione del risparmio energetico e dell'efficientamento energetico, con l'inserimento non solo delle garanzie previste dalla normativa italiana, ma con ulteriori forme di rafforzamento contrattuale sia premianti che reprimenti (bonus/penali), anche in vista di quanto stabilito dal "conto termico", che prevede la finanziabilità degli interventi energetici solo a valle della loro realizzazione. Per la definizione della proposta sono state contattate le diverse Amministrazioni pubbliche interessate al tema, CONSIP, AVCP, CDDP e ITACA-Conferenza Unificata, per un primo confronto da cui si è evidenziata la necessità di dover coinvolgere anche i Ministeri competenti per chiarire alcuni aspetti giuridici.

Lo schema contrattuale presuppone un cambio di logica contrattuale, posponendo la fornitura e la manutenzione degli impianti all'effettiva realizzazione degli interventi necessari per l'abbassamento della classe energetica degli edifici. In buona sostanza si potrebbe prevedere un contratto unico che subordina la futura fornitura e manutenzione a valle della conclusione degli interventi previsti dal contratto Energy Performance Contract (EPC). Essa rappresenterà la prima e necessaria fase per il perfezionamento del contratto energetico in senso stretto.

Il contratto così impostato deve ovviamente contenere una serie di clausole che se da un lato devono garantire la PA, dall'altro devono prevedere un'effettiva remunerabilità per la ESCO. Pertanto se si devono individuare delle penali in caso di mancato risparmio, bisogna altresì prevedere dei bonus da riconoscere alla ESCO per i maggiori risparmi rispetto a quelli medi garantiti.

Il vantaggio di sottoscrivere dei contratti che prevedono la subordinazione della fornitura e della manutenzione all'effettiva realizzazione degli obiettivi previsti dal contratto EPC consente tra l'altro di garantire alla PA che, se il contraente aggiudicatario sarà una società produttrice di energia, la stessa è obbligata dal dispositivo contrattuale a dismettere la classica logica del mercato che recita: "maggior consumo uguale maggior profitto", e a ricercare il maggior profitto nella effettiva remunerabilità della logica della green economy

Dettagli sull'argomento sono contenuti nel rapporto RdS/2013/274.

b.5 Lay-out di progetto di riqualificazione energetica di un edificio della PA

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e CITERA (Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura) dell'Università di Roma Sapienza, riguardano un'analisi energetica dell'intero patrimonio edilizio scolastico del Comune di Roma e la realizzazione di un intervento dimostrativo di riqualificazione energetica in un edificio pubblico con destinazione d'uso scolastico.

L'ENEA ha svolto le attività per quanto riguarda: le fasi di analisi e valutazione degli edifici individuati con il coinvolgimento della Provincia di Roma; l'analisi e le valutazioni prestazionali sull'edificio scelto; le simulazioni dinamiche sul sistema edificio impianto e su singoli ambienti dei diversi corpi che costituiscono il complesso edilizio per le valutazioni della prestazione energetica; ha definito, con il gruppo di CITERA, gli interventi e le soluzioni per l'involucro e gli impianti.

Analisi del patrimonio edilizio scolastico a livello nazionale

Periodizzazione: Al 2012 gli edifici scolastici censiti in Italia sono 36220 unità, di cui 33078, che in valori percentuali rappresentano il 91,3%, sono utilizzati esclusivamente per l'attività scolastica ed il restante 8,7% è utilizzato per attività di tipo non scolastico. Solamente il 4% di tali edifici è stato realizzato negli anni antecedenti il 1900, mentre nel ventennio compreso tra il 1960 ed il 1980 si è realizzato il 44% degli edifici scolastici. Dal 1993 al 2000 il flusso medio di edifici di nuova realizzazione è di 2.068 fabbricati, ovvero il 4% degli edifici scolastici esistenti. In base

all'elaborazione e diffusione dei risultati concernenti la rilevazione sulle scuole secondarie di secondo grado, effettuate dall'ISTAT e dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, nella Regione Lazio vi sono 647 scuole, di cui 440 scuole pubbliche statali e 187 scuole private.

Tecnologia: Il 67% del totale parco immobiliare scolastico è stato realizzato con tecnologia costruttiva mista, i cui materiali più diffusi sono cemento armato e muratura, mentre con cemento armato e pannelli prefabbricati soltanto il 2% del totale realizzato. Il 15% è stato realizzato in muratura portante con pietra o mattoni. La muratura portante in laterizio è stata utilizzata nel 14% degli edifici. Tra gli edifici scolastici presenti sull'intero territorio nazionale, solo lo 0,47% è stato realizzato secondo i parametri costruttivi della bioedilizia e il 35,79% necessita a tutt'oggi di urgenti misure per la manutenzione straordinaria. Inoltre il 17,62% non dispone di alcun impianto elettrico a norma.

Impiantistica: Dall'analisi dei dati relativi all'anno 2011, reperiti per conto di Legambiente, negli edifici scolastici italiani, soltanto il 12,40% produce energia elettrica e/o termica da fonte rinnovabile. Con il 60,58%, più confortevoli ma non sufficienti, sono i valori dei dati relativi alla presenza di fonti di illuminazione a basso consumo, in quanto rispetto al precedente anno, si è avuta una contrazione dei valori pari al -5%. Nella quasi totalità degli edifici scolastici si utilizza la tipologia di riscaldamento tradizionale tramite i classici radiatori in ghisa, basati quindi sul principio di riscaldamento a convezione con caldaie a gas utilizzate nel 73,2% degli edifici scolastici ed a gasolio per il 24,0%. L'utilizzo di unità di trattamento dell'aria è stato riscontrato solo nel 2,5% dei casi e il 2% per impianti di riscaldamento che funzionano solo con l'elettricità o biomassa o carbone.

Analisi del patrimonio edilizio scolastico a livello provinciale

Metodologia di indagine: Utilizzando le normali documentazioni cartacee relative alle Scuole Secondarie di II grado della Provincia di Roma, in base alla classificazione della tipologia degli Istituti adottata dal Ministero dell'Istruzione, si è proceduto all'analisi di inventario, utilizzando dati reperibili anche presso gli Istituti da cui derivare dati utili alla ricerca. Lo screening dettagliato è stato eseguito circoscrivendo come definitivo ogni campo tematico relativo alla sua completezza di indicazioni.

Periodizzazione: Nella Provincia di Roma gli edifici adibiti a Scuole Secondarie di II grado o con cambio di destinazione d'uso a Scuole Secondarie di II livello, il cui anno di realizzazione risale dai primi anni del 1900 al 1959 sono 28 unità, di cui 22 sono presenti nella città di Roma. In base ai dati visionati gli edifici realizzati dal 1960 al 1979 nella Provincia di Roma sono 96 unità, di cui 62 ubicati nella città di Roma. Gli edifici realizzati dal 1976, anno di promulgazione della prima legge sulla regolamentazione energetica degli impianti, all'anno 2008 in riferimento all'ultimo edificio realizzato, sono 51 unità, di cui 21 sono ubicati nella città di Roma.

Tecnologia: Il 27% dell'intero patrimonio edilizio per l'istruzione secondaria superiore, è realizzato in muratura portante costituita da blocchi di pietra cementati con malte.

Gli edifici con tamponamenti in pannelli prefabbricati, soprattutto quelli edificati prima del recepimento della Legge 10/91 sul risparmio energetico, spesso realizzati con involucri scadenti e senza strato isolante, costituiscono il 4% dell'intero parco immobiliare con struttura portante in acciaio e tamponamento in pannelli prefabbricati; il 6% con struttura portante in cemento armato e tamponamento in pannelli prefabbricati. La tecnologia costruttiva e i materiali maggiormente riscontrati nell'analisi degli edifici, è la struttura portante in cemento armato con tamponature delle pareti in muratura, presente nel 63% degli edifici oggetto di analisi e realizzati dal 1950 al 2000. Classe energetica di riferimento e caratterizzazione energetica in relazione alla tipologia costruttiva adottata per i singoli edifici: Su 359 edifici ospitanti le Scuole Secondarie di II grado della Provincia di Roma il 64% del patrimonio immobiliare riguarda edifici di classe energetica di tipo G, la maggioranza dei quali è stato realizzato con struttura portante in cemento armato e tamponature in pannelli prefabbricati, con epoca di edificazione risalente soprattutto al ventennio '60-'80, nel periodo cioè antecedente il recepimento della Legge 10/91 sul risparmio energetico. Gli edifici con classe energetica di tipo D ed F sono realizzati interamente in muratura portante di notevole spessore e quindi con importanti coefficienti di isolamento termico, la maggioranza dei quali realizzati nel primo cinquantennio del novecento.

Analisi degli edifici di scuola media superiore di II° livello nel Comune di Roma

Nel Comune di Roma vi sono 246 edifici ospitanti attività per le Scuole Medie Superiori di II° Livello, di cui 19 utilizzati per i doppi turni d'istruzione durante le ore serali.

L'analisi che seguirà, comprende il periodo di costruzione, la superficie occupata da ciascun edificio, la classe energetica di appartenenza e quindi le tecnologie e i materiali utilizzati, le schermature, i livelli, la contiguità con altri edifici.

Periodizzazione: Al fine di un accurato "screening" degli edifici oggetto di analisi, si è proceduto in primo luogo alla classificazione in base a definiti periodi corrispondenti all'emanazione di due importanti leggi sul tema del risparmio energetico degli edifici, così suddivisi:

- periodo compreso dai primi anni del 1900 al 1950 caratterizzato da edifici realizzati prevalentemente in muratura portante. Realizzati senza norme per il risparmio energetico: 15% edifici realizzati;
- periodo compreso dal 1951 al 1975, caratterizzato da edifici realizzati prevalentemente con struttura in cemento armato e tamponature in pannelli prefabbricati o muratura. Realizzati senza norme per il risparmio energetico: 62% edifici realizzati;
- periodo compreso dal 1976 al 1990, scandito dalla Legge n.373 del 30 aprile 1976, contenente norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici di nuova costruzione od oggetto di ristrutturazioni straordinarie: 20% edifici realizzati;
- periodo compreso dal 1991 ad oggi, gli edifici vengono realizzati in base all'applicazione della Legge n.10 del 9 gennaio 1991, contenente le norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia limitatamente ai soli 3 edifici realizzati successivamente all'entrata in vigore del Dlgs 311 del 2006.

Classe energetica di riferimento e caratterizzazione energetica in relazione alla tipologia costruttiva adottata per i singoli edifici. Dall'analisi dei dati riguardanti la classe energetica di appartenenza dei singoli edifici si riscontra la necessità di attivare in modo efficace una metodologia di riqualificazione degli stessi, al fine di raggiungere livelli ottimali di efficientamento energetico per ridurre gli sprechi e quindi avvicinarsi il più possibile al modello di edificio NZEB.

- 18% edifici in classe energetica di tipo F: tutti gli edifici hanno infissi privi di schermature e sono realizzati con struttura portante in muratura oppure in cemento armato e tamponamento in muratura
- 82% edifici in classe energetica di tipo G: 74% degli edifici scolastici realizzato con struttura portante in cemento armato e tamponamento in muratura di blocchi in cemento o mattoni; 10% degli edifici è realizzato con struttura portante in cemento armato e tamponamento in pannelli prefabbricati; 11% realizzati interamente in muratura e infissi schermati con serrande in plastica avvolgibile. Solo un edificio è realizzato con struttura portante in acciaio e tamponamento in pannelli prefabbricati.

Intervento di riqualificazione su un edificio pubblico ad uso scolastico

La modularità delle soluzioni adottate nel caso studio applicativo, comporta per esemplificazione metodologica, la definizione di un Capitolato EPC (Energy Performance Contract) conforme alla Direttiva sull'efficienza energetica del 2012/27/UE, con inserite le possibili combinazioni e la valutazione economica per i costi di realizzazione e di esercizio per l'applicazione delle migliori tecnologie disponibili sul mercato italiano per la produzione di energia elettrica e termica da fonti rinnovabili e dei materiali con elevate caratteristiche prestazionali, impiegando il concetto di riciclo e di cantiere verde, al fine di poter conseguire una elevata qualità ambientale e consumo minimo di risorse non rinnovabili, per un impatto minimo sull'ambiente circostante.

Il caso studio proposto con carattere di replicabilità, è stato individuato nell'ambito di una tipologia edilizia con carenza di progettazione bioclimatica sostenibile analoga alla maggioranza degli edifici scolastici di pertinenza della Provincia di Roma che necessitano interventi urgenti di retrofit.

Lo screening prodotto dall'intervento del caso studio infatti, deve fornire ai gestori dei plessi scolastici, la metodologia generale per la progettazione, realizzazione e gestione di edifici NZEB.

Contesto

Attualmente l'edificio dell'Istituto Tecnico A. Genovesi (Roma), in accordo con gli Assessorati alle Politiche della scuola e AA.GG. e Patrimonio della Provincia di Roma, il Liceo Artistico di via di Ripetta e l'Auditorium - Parco della Musica, è sede di iniziative culturali, quali mostre, sperimentazioni didattiche, presentazione libri, corsi di aggiornamento e di apprendistato, oltre al laboratorio di plastici e di fotografia ed attività di tirocinio per studenti e ricerche per conto di Istituzioni ed Enti pubblici e privati. L'edificio è facilmente raggiungibile tramite servizio di trasporto pubblico urbano o con mezzi privati. La superficie calpestabile esterna che circonda l'intero edificio si compone di uno spazio non interamente pavimentato e con alcune alte alberature su terreno incolto.

La tipologia edilizia singola e l'Impianto planimetrico è caratterizzato da 3 corpi di fabbrica che si sviluppano su due corti interne aperte ed orientate a sud - est in prossimità delle pendici di Villa Glori. Le due corti sono finestrate ai lati e solo una ha un accesso interno.

Profili di utenza

L'uso dell'edificio è caratterizzato da più profili d'utenza (Università Sapienza e Tor Vergata) coerenti nell'uso degli spazi della didattica, corrispondenti a circa 10 ore/giorno. Il Laboratorio Fotografico ha un utilizzo di circa 6 ore/giorno.

Tecnologia

L'edificazione della scuola risale al 1962, l'edificio risulta quindi realizzato in assenza di normativa per il contenimento dei costi del consumo energetico per usi termici e di eco-compatibilità dei materiali utilizzati. L'involucro opaco è realizzato con struttura portante in cemento armato e tamponatura in mattoni pieni.

L'analisi energetica eseguita ha messo in evidenza un disagio termico invernale-estivo dovuto a scarsa efficienza energetica da mettere in relazione a:

- assenza di isolamento termico - acustico dell'involucro opaco e trasparente
- assenza di sistemi di controllo per schermatura della luce solare diretta e indiretta
- elevata domanda di energia elettrica e di combustibili fossili
- insoddisfacente qualità dell'aria.

Con l'individuazione delle tecnologie appropriate per l'energy-saving, in seguito all'attenta valutazione delle opportunità di tipo tecnico ed economico finanziario-ambientale, è stata elaborata una strategia per minimizzare il fabbisogno di energia primaria richiesto dall'edificio e migliorare gli apporti dovuti agli scambi termici tra l'ambiente esterno- interno necessari al recupero dei costi addizionali attraverso la riduzione dei consumi energetici.

Gli interventi di efficientamento energetico proposto riguardano:

- intervento non strutturale ma di manutenzione straordinaria realizzata con cantiere verde per ridurre al minimo i costi e l'impatto ambientale;
- abbattimento dei costi di condizionamento dell'aria con applicazioni di soluzioni tecnologiche innovative a livello di impianti per la produzione di energia rinnovabile quali solare elettrico fotovoltaico per alimentare le pompe di calore e l'illuminazione esterna e solare termico per l'acqua calda sanitaria;
- progettazione dell'involucro esterno con soluzioni di tipo passivo e attivo, utilizzo di materiali a basse emissioni riciclabili e riciclati e materiali isolanti naturali;
- microgenerazione locale di potenza termoelettrica mediante l'utilizzo di tecniche di cogenerazione e trigenerazione;
- applicazione di rilevatori, sensori e attuatori per il controllo automatico e lo smart metering energetico;
- ottimizzazione del comfort termoigrometrico acustico e visivo degli ambienti mediante l'utilizzo di opportune soluzioni tecnologiche avanzate e materiali innovativi;
- adozione di un sistema di controllo domotico per l'uso intelligente dell'intero sistema edificio- impianto, finalizzato al controllo in tempo reale della potenza prodotta tramite energia verde ed utilizzata dal sistema per usi finali quali il riscaldamento, il raffrescamento e l'alimentazione di utenze elettriche;
- gestione ecologica dei rifiuti e recupero delle acque grigie e piovane;
- razionalizzazione e rifunzionalizzazione degli spazi esterni con nuove pavimentazioni pedonali - carrabili differenziate; valorizzazione delle alberature presenti e piantumazione di nuove specie arboree con area di ritenzione vegetata. Illuminazione esterna a elevata efficienza e inserimento di colonnine fotovoltaiche per la ricarica elettrica dei motoveicoli.

Dettagli sull'attività svolta e sulle conclusioni del caso studio sono contenute nel rapporto RdS/2013/152.

c. Proposta di revisione della Norma UNI 10349

c.1 Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

In questo sotto obiettivo sono state affrontate molteplici tematiche connesse in primo luogo alla definizione di una nuova banca dati climatici composta da record con cadenza oraria di quei parametri meteorologici che sono basilari per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio, per la climatizzazione estiva ed invernale, e per la verifica della prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia.

Il lavoro svolto nell'ambito di un accordo di collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, conclude e aggiorna le ricerche svolte nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma apportando modifiche nella procedura di calcolo dell'anno tipo climatico e nella selezione dei mesi caratteristici.

ENEA ha contribuito alle attività di definizione della banca dati e di confronto tra gli archivi dei dati climatici, raccolti nelle precedenti annualità, confrontandoli con quelli acquisiti tramite rilevamenti da satellite. ENEA ha poi definito l'indicatore di severità climatica All Weather, per la zonizzazione estiva del territorio nazionale. L'aggiornamento della metodologia di calcolo ha permesso di ottenere risultati in maggior misura realistici soprattutto in relazione all'andamento del tracciato medio mensile dei parametri temperatura e radiazione solare su piano orizzontale.

A partire dagli anni tipo climatici vengono definiti i dati medi mensili e gli indici sintetici relativi alla zonizzazione climatica del territorio. Vi è dunque l'obiettivo di raggiungere l'omogeneizzazione delle fonti degli archivi di dati climatici presenti nei vari disposti legislativi e nelle norme tecniche in maniera da garantire la congruenza e la consistenza tra le basi. Per tali ragioni la determinazione dei parametri di severità del clima è stata basata sui record dell'anno tipo.

Parte del lavoro ha riguardato il confronto tra gli archivi di dati climatici grezzi già precedentemente raccolti dai diversi enti di rilevazione e valori storici provenienti da banche dati ritenute affidabili e consolidate. Tali confronti, in riferimento ai valori storici, hanno messo in luce, soprattutto per quanto concerne il parametro "radiazione solare su piano orizzontale" scostamenti rilevanti per le seguenti stazioni: Bari; Imperia; Monza; Andria; Foggia; Varese; Brindisi; Roma; Torino; Lecco; Viterbo; Siena; Aosta; Como; Arezzo. Per tali stazioni sono stati quindi richiesti nuovi dati e sono stati elaborati nuovi anni tipo climatici in conformità alle nuove procedure di calcolo così come definite dal gruppo di lavoro CTI GL 102/SG 09. I risultati mettono in luce un aumento sensibile della qualità del tracciato ed un allineamento dei risultati con quelli degli archivi di riferimento.

Sono stati inoltre richiesti dati grezzi integrativi per le località delle regioni Basilicata, Campania ed Umbria di cui si disponeva di una quantità di dati esigua.

Sono state poi definite le procedure di calcolo per determinare le differenze di temperatura cumulate e gli altri indici che descrivono in maniera sintetica il clima di una località da utilizzare per la classificazione energetica del territorio. Nel rapporto RdS/2013/153, viene fornita una panoramica sui precedenti sistemi di calcolo posti in essere nel D.M. 10/03/1977 e nel D.P.R. 412/1993 favorendo in conclusione la metodologia applicativa proposta dal gruppo di lavoro CTI GL 102/SG 09. Tale metodologia di calcolo dei gradi giorno invernali, è quella della UNI EN ISO 15927-6 "Prestazione termoigrometrica degli edifici - Calcolo e presentazione dei dati climatici - Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)". Nella normativa tecnica non esistono altri riferimenti per il calcolo di indici sintetici relativi alla zonizzazione climatica del territorio. Tuttavia gli indirizzi del gruppo di lavoro CTI GL 102/SG 09 sono stati quelli di determinare, sia per il periodo invernale che per quello estivo, ulteriori parametri di completamento quali le differenze cumulate di umidità massica, la radiazione solare cumulata e l'indice di severità climatico "All Weather" messo a punto dall'ENEA.

L'ultimo indice permette di raggruppare in un unico parametro i descrittori climatici che considerano temperatura dell'aria esterna, umidità massica dell'aria esterna e radiazione solare globale su piano orizzontale.

Completa il rapporto l'insieme delle procedure di calcolo relative alla determinazione dei dati rappresentativi delle condizioni climatiche limite, da utilizzare per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva ed invernale e per valutare il rischio di surriscaldamento (secondo UNI EN ISO 15927-2 e UNI EN ISO 15927-5). Nel documento vengono dunque presentate definizioni, metodi di calcolo e di presentazione dei dati climatici mensili da adoperare per la determinazione del carico termico di progetto per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici e per la progettazione degli impianti di climatizzazione estiva ed invernale.

La qualità in termini di affidabilità, attendibilità e realistica dei parametri che compongono l'anno tipo climatico, ha effetti diretti sulla determinazione dei parametri sintetici di zonizzazione climatica del territorio. Viene rilevato che, in linea di principio, gli anni caratteristici (e di conseguenza i mesi caratteristici) dovrebbero riprodurre il clima medio di una data località, per tale motivo, poiché la determinazione degli indicatori sintetici che descrivono il clima caratteristico di una località, dipende, anch'essa, dai valori medi, si hanno problemi nell'utilizzo degli anni caratteristici se questi sono effettivamente rappresentativi. Tale questione, associata alla disponibilità di dati rilevati, diviene particolarmente complessa poiché, qualità e lunghezza dei dati delle serie storiche sono, in Italia, eccessivamente disuniformi sul territorio.

I risultati della Ricerca di Sistema Elettrico confluiranno nella revisione della norma tecnica UNI 10349:1994.

c.2 Integrazione dell'Indice di Severità Climatica nella nuova norma UNI 10349-3 "Riscaldamento e Raffrescamento degli edifici. Differenze di temperature cumulate (Gradi Giorno altri indici sintetici)

L'applicazione del Dlgs.192/05, prevede che ai fini della certificazione energetica in edilizia, sia valutato il fabbisogno di energia primaria di un edificio, e successivamente, sia assegnata ad esso, in funzione di tale

parametro, una classe di efficienza energetica. Al momento, in Italia, sono stati fissati i limiti al fabbisogno solo per quanto riguarda la climatizzazione invernale. Il territorio nazionale è stato suddiviso, infatti, in zone climatiche invernali in conformità a un indice climatico, definito dai gradi-giorno invernali, e sono stati individuati i valori limite del fabbisogno energetico su tale base. La diffusione dei sistemi di condizionamento estivi, con il conseguente aumento dei consumi energetici, rende necessario procedere, anche in tal caso, alla definizione di zone climatiche estive contraddistinte da un indice di severità climatica estivo. La definizione di questo indice estivo presenta maggiori difficoltà rispetto al corrispondente indice invernale giacché le variabili climatiche di cui tenere conto sono più numerose e più complesse da valutare.

Nei precedenti lavori è stata proposta una prima applicazione di tale indice ed è stata verificata la validità del modello matematico utilizzato, prendendo in esame, per il calcolo del fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo le caratteristiche climatiche (temperatura, radiazione solare e umidità) riportati nella norma UNI 10349/94; ne è conseguita la assegnazione degli 8094 comuni italiani a sette zone climatiche estive (da A a G) di indice di severità estivo e, quindi, di fabbisogno energetico crescente.

Dall'anno 2009, il CTI (Comitato Termotecnico Italiano - Energia e Ambiente), avvalendosi degli esperti del Gruppo CTI 102/GL09 "Revisione UNI 10349" sta curando l'aggiornamento dei dati climatici secondo la metodologia prevista dalla norma europea UNI EN ISO 15927-4/2005 che introduce la definizione dell'anno meteorologico tipo (TRY – Test Reference Year).

Nel periodo 2012-2013 esperti ENEA hanno partecipato ai lavori del Gruppo CTI con l'obiettivo di introdurre nella nuova UNI 10349 l'indice di severità climatica ENEA.

I lavori di aggiornamento della norma sono tuttora in corso ma si sono resi disponibili, in una forma pressoché definitiva (sono infatti ancora sotto analisi i dati per alcune località), i dati climatici, aggiornati sulla base del TRY, necessari per il calcolo dell'indice di severità climatica estiva per le 110 località previste dalla nuova UNI 10349.

Nel rapporto RdS/2013/154 sono riportati i valori dell'indice risultati dei calcoli basati sui nuovi parametri climatici.

d. Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico

d.1 Caratterizzazione di materiali granulari innovativi; analisi dei sistemi di pilotaggio della irrigazione con sensoristica a basso costo

Nel quadro di una collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agro-ambientali dell'Università di Pisa è stata prodotta un'analisi delle caratteristiche richieste ai substrati e agli impianti di irrigazione utilizzabili per la realizzazione dei tetti verdi in base a quanto prescritto dalla norma UNI 11235 - Istruzioni per la progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione delle opere a verde pensile (2007). La norma indica che il requisito principale dei tetti verdi è di accumulare acqua durante le precipitazioni meteoriche o le irrigazioni e cederla successivamente durante i periodi di necessità e precisa che l'acqua presente nei materiali, ma non disponibile per l'assorbimento radicale, non può essere considerata ai fini del calcolo della capacità di accumulo idrico. La norma UNI 11235 identifica anche le tipologie di materiali granulari da utilizzare come substrati di crescita, tra i quali troviamo la pomice, l'argilla espansa e la perlite espansa.

Oltre a precisare gli spessori minimi dello strato colturale e i valori dell'accumulo idrico (40-150 l/m²) per le varie tipologie di vegetazione, la norma indica che nelle regioni mediterranee, dove in estate si determina un deficit idrico, poiché la precipitazione è inferiore all'evapotraspirazione, è opportuno prevedere un impianto di irrigazione di soccorso. Dall'esame delle funzioni e delle caratteristiche, soprattutto fisiche, richieste ai substrati e ai sistemi irrigui utilizzabili per la realizzazione dei tetti verdi, è emerso quanto segue:

- i substrati più adeguati sono quelli a base di perlite, pomice e argilla espansa, eventualmente in miscela tra di loro;
- i sistemi di microirrigazione (con gocciolatori, tubi porosi o microspruzzatori) devono essere dotati di un sistema di controllo automatico che utilizzi dei sensori dielettrici in grado di monitorare il livello di umidità del substrato. Nel caso sia necessario controllare più settori irrigui, è possibile realizzare una rete wireless di connessione dei vari sensori, tutti interfacciati a una centralina computerizzata come quelle disponibili in commercio.

L'attività svolta è documentata nel rapporto RdS/2013/155.

d.2 Ecosistemi come risorsa di germoplasma per un verde pensile urbano ispirato alla sostenibilità. Caratterizzazione fisiologica di specie vegetali spontanee utilizzate per la realizzazione di tetti verdi in ambiente urbano

Nelle aree urbane gli spazi destinate al verde ornamentale e ricreativo risultano quasi sempre limitati e la realizzazione di giardini pensili (tetti e pareti verdi) richiede sempre più frequentemente il ricorso a tecniche alternative a quelle tradizionali, compresa la scelta del materiale vegetale più idoneo dal punto di vista ecologico e biologico. La vegetazione deve infatti svolgere un ruolo importante in molte aree urbane degradate da un punto di vista ambientale e paesaggistico, fornendo un significativo contributo quantitativo al benessere psicologico e reale della popolazione. Obiettivo di questo studio è quello di selezionare, tra una vasta gamma di specie vegetali teoricamente disponibili, quelle più adattate alle condizioni ambientali sensu latu dei tetti verificandone la compatibilità ecologica, biologica ed agronomica nell'ottica di una sostenibilità del cosiddetto "urban greening".

Le specie selezionate, tutte specie spontanee nell'ambiente Mediterraneo, sono: *Anthemis maritima*, *Armeria pungens*, *Calamintha nepeta*, *Centranthus ruber*, *Crithmum maritimum*, *Euphorbia characias*, *Euphorbia pithyusa*, *Glaucium flavum*, *H. italicum subsp. microphyllum*, *Helichrysum italicum*, *Helichrysum stoechas*, *Lavandula stoechas*, *Micromeria juliana*, *Otanthus maritimus*, *Rosmarinus officinalis var. prostrata*, *Ruta chalepensis*, *Satureja montana*, *Scrophularia canina*, *Sedum rupestre* e *Thymus serpyllum*.

Le specie prescelte sono state propagate utilizzando i semi raccolti in situ. Tutte le specie esaminate si sono mostrate adatte per la realizzazione di tetti verdi. La produzione di biomassa alla fine dell'esperimento è variata da 7 a 69 g/pianta con una densità di impianto di 20 piante/m². Particolarmente interessanti sono apparse *Anthemis maritima* e *Glaucium flavum*, specie a rapido accrescimento per le quali si può pensare di ridurre la densità di piantagione. Buoni risultati sono stati ottenuti anche con *Euphorbia characias*, *Euphorbia pithyusa*, *Helichrysum italicum*, *Helichrysum stoechas* e *Lavandula stoechas*.

Il rapporto RdS/2013/275 contiene le schede tecniche delle 20 specie oggetto dello studio sperimentale e di due specie del genere *Origanum*: maggiorana (*O. majorana*) e *O. vulgare*.

d.3 Eco-sistemi vegetali per l'efficienza energetica e il risparmio di energia negli edifici urbani

Il verde è da sempre un elemento di progetto nell'architettura, fino a poco tempo fa il suo utilizzo era soltanto a scopo decorativo, oggi il verde viene, invece, considerato un vero e proprio componente edilizio. Mentre per parete verde (Vertical Greenery System, VGS) si intende un fronte edilizio ricoperto da specie vegetali, aventi caratteristiche rampicanti e/o ricadenti, aggrappate direttamente o indirettamente, tramite supporti verticali di sostegno alla muratura, la realizzazione di coperture vegetali o di giardini, con lo scopo di creare una barriera isolante tra il solaio esterno e lo spazio circostante, oltre che con funzione decorativa o alimentare, la copertura vegetalizzata degli edifici si definisce tetto verde (Green Roof, RF). Le facciate verdi offrono diversi tipi di benefici a partire da quelli che riguardano i miglioramenti del microclima esterno fino ad arrivare a benefici riguardanti gli ambienti interni.

I sistemi VGF-GR contribuiscono a ridurre il fenomeno delle isole di calore e al miglioramento della qualità dell'aria e possono fungere, inoltre, da elemento filtrante per polveri e gas. L'effetto isolante del "cuscino verde" è dovuto allo strato d'aria che si crea tra superficie verde e la superficie muraria, il quale funge da cuscinetto isolante; inoltre una parte delle radiazioni infrarosse, irradiate dall'edificio, viene riflessa dalle foglie mentre un'altra parte viene assorbita (riduzione delle perdite di calore radiative dell'edificio); il cuscino di verde attenua anche i movimenti d'aria sulla superficie della costruzione così da ridurre le perdite di calore per convezione. Le pareti verdi proteggono le strutture opache dalla radiazione solare, evitando il surriscaldamento delle stesse, tutto ciò ovviamente influisce sia sui carichi di condizionamento che sul comfort termo-igrometrico dell'ambiente interno. I rivestimenti vegetali posti davanti a pareti in muratura, possono contribuire alla loro protezione (contro gli agenti atmosferici) e quindi aumentarne la durata nel tempo.

Per l'oggettiva valutazione degli effetti del verde parietale sui carichi termici delle pareti sono essenziali delle analisi di tipo quantitativo che permettano di valutare il risparmio energetico attribuibile a questo particolare tipo di architettura. A questo scopo, ENEA ha contribuito allo sviluppo di un modello matematico per definire gli effetti delle piante sui flussi energetici degli edifici in termini di riduzione della temperatura nei periodi estivi e di protezione dell'edificio da potenziali inquinanti. A questo proposito, il modello ha preso in considerazione lo sviluppo teorico del parametro "Green Factor" (costante verde), in accordo con la bibliografia esistente e la definizione di un quadro generale relativamente alle essenze vegetali suscettibili di impiego come sistemi VGS-GR negli edifici localizzati in aree climatiche mediterranee.

Sono state effettuate inoltre una serie di valutazioni tecniche al fine di elaborare delle proposte applicative di sistemi VGS-GR. In particolare sono state prese in considerazione ipotesi di lavoro da sviluppare presso il C.R. ENEA

Casaccia. Tale ipotesi sono state sviluppate principalmente mediante tavole di studio rappresentative di edifici interni sui quali realizzare le coperture vegetali. Per quanto riguarda i materiali vegetali, è stato definito un quadro generale delle essenze vegetali di tipo rampicante suscettibili di impiego nei sistemi a parete per gli edifici in area mediterranea. Contemporaneamente è stata avviata una sperimentazione mirata allo studio delle caratteristiche bio-agronomiche e fenotipiche di essenze vegetali e di substrati colturali per valutare anche l'impatto visivo. In particolare, la sperimentazione è stata focalizzata su materiali vegetali, substrati ed elementi strutturali di sostegno alla copertura vegetale. Sono stati scelti materiali vegetali adatti sia alla realizzazione di coperture a verde estensivo a tappeto erboso che di coperture a verde intensivo leggero utilizzabili anche come giardino pensile. Tali tipologie di coperture tuttavia hanno impatto diverso sia come carico sulla struttura dell'edificio sia sul miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio. Elementi aggiuntivi presi in considerazione per la valutazione dei materiali biologici e strutturali sono: la manutenzione, la velocità di crescita della coltura, la resistenza nel tempo ai fattori climatici, l'impatto.

Dettagli sull'attività sono riportati nel rapporto RdS/2013/274.

d.4 Modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo . Linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo

Nel quadro della collaborazione con il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali dell'Università di Bari, ENEA ha contribuito allo studio e alla individuazione dei parametri bio-agronomici di interesse per lo sviluppo di un modello energetico finalizzato all'incremento dell'efficienza energetica per edifici caratterizzati da applicazioni di sistemi verdi.

In estate le città risultano più calde di circa 5 °C rispetto alle aree periferiche e rurali in quanto gli edifici e le strade assorbono e rilasciano calore. Il fenomeno del riscaldamento urbano, noto come "isola di calore urbana", influenza negativamente le condizioni esterne di comfort umano, incrementa la concentrazione di polveri sottili e di inquinanti, contribuisce a un incremento della domanda di energia per il condizionamento climatico all'interno degli edifici, così come aumenta l'impatto ambientale a causa della crescente domanda di energia. Una soluzione tecnologica sostenibile per migliorare l'efficienza energetica degli edifici è l'uso di tetti e pareti verdi al fine di ridurre il consumo di energia per il condizionamento estivo e migliorare l'isolamento termico in inverno.

L'Università di Bari ha collaborato con l'ENEA allo sviluppo un modello energetico finalizzato all'incremento dell'efficienza energetica per edifici caratterizzati dall'applicazione di sistemi verdi (Sotto obiettivo d.3). Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha, inoltre, analizzato il quadro normativo nazionale e internazionale per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali. L'uso di tetti verdi e pareti può contribuire a mitigare il fenomeno dell'isola di calore abbassando i valori della temperatura dell'aria esterna, a ridurre le emissioni di gas quali la CO₂, a ridurre la quantità di acque meteoriche scaricate nella rete fognaria, a incrementare l'isolamento acustico dell'edificio e l'attutimento dei suoni, a contribuire al comfort umano, a migliorare la qualità dell'aria e, soprattutto, a ridurre l'uso di energia per il condizionamento degli edifici.

L'attività ed relativi risultati sono descritti nel rapporto RdS/2013/160.

d.5 Sviluppo di materiali e tecnologie per la riduzione degli effetti della radiazione solare. Implementazione delle prestazioni e nuovi prodotti per il controllo della radiazione solare e costruzione di un archivio cartaceo di prodotti innovativi

Oggetto della ricerca svolta dal Politecnico di Milano, dipartimento AbC, è lo studio di sistemi per il controllo della radiazione solare incidente su superfici d'involucro trasparente. Le attività prevedono:

- l'analisi dei principali prodotti in uso con finalità di protezione solare, l'individuazione delle variabili geometriche o materiche per macro classi e l'analisi qualitativa della variazione prestazionale;
- la selezione di "nuovi" prodotti per protezioni solari, la verifica della possibile integrazione (compatibilità tecnologica) del materiale/prodotto/componente nei sistemi di protezione solare e analisi delle proprietà ottico-radiative (trasmissione e riflettanza VIS-NIR) per l'implementazione delle informazioni tecniche relative;
- lo studio e lo sviluppo di un sistema di protezione solare a comportamento adattivo (attivo e/o passivo) con integrazione parziale di smart materials.

Gli edifici a fabbisogno energetico ridotto per la climatizzazione richiedono involucri performanti a comportamento adattivo, ossia capaci di modificare il loro comportamento dal punto di vista energetico (modulazione dei

segnali energetici e luminosi) al variare delle forzanti esterne e delle sollecitazioni interne. In questa logica di funzionamento dell'involucro, le parti trasparenti e le protezioni solari divengono il punto debole e di forza nel funzionamento energetico dell'organismo edilizio. Le strategie per il controllo degli apporti solari sono molteplici: agendo direttamente sulla specchiatura mediante depositi o accoppiamento di uno o più strati (pellicole) o abbinando al vetro uno o più layer (elementi continui o discontinui, permeabili o meno all'aria, regolabili o fissi, interni o interposti). L'agire unicamente sulle specchiature significa disporre di un sistema a comportamento efficiente (vetri selettivi, riflettenti, basso-emissivi) ma statico ossia non in grado di modificare il comportamento al variare delle condizioni di cielo.

La dinamicità di comportamento della componente trasparente può essere demandata ad uno strato aggiuntivo che, variando l'assetto, consente una variazione della prestazione ottico-energetica in funzione del contesto sollecitante. Lo sfruttamento di particolari configurazioni geometriche unitamente al controllo delle proprietà radiative delle superfici (distinguendo tra superficie interna e superficie esterna ossia tra superfici rivolte verso il vetro o verso la volta celeste) possono rendere il sistema edificio altamente performante.

Le attività svolte nell'ambito di questo sotto obiettivo hanno riguardato:

- 1) la caratterizzazione delle proprietà radiative di materiali a geometria complessa e a prestazione bidirezionale (tessuti in polimero, tele metalliche e lamiere microforate) con particolare attenzione alla definizione della variazione della prestazione ottica al variare della geometria solare e del verso di posa in opera che può portare ad una sovrastima della disponibilità di luce naturale in ambiente confinato o di radiazione incidente sul vetro (dipendenza angolare della prestazione). Tale indagine è stata effettuata al fine di colmare una lacuna relativa alle proprietà ottiche di materiali attualmente in uso nel settore delle costruzioni (ma di cui non sono disponibili dati utili al fine delle modellazioni illuminotecniche ed energetiche perché non forniti dallo stesso produttore);
- 2) la ricerca e la selezione di materiali e prodotti messi a punto in altri settori e potenzialmente impiegabili nelle protezioni solari (tessuti metallici, tessuti a trama tridimensionale, griglie tridimensionali, lamiere forate a geometria bidirezionale) e la successiva caratterizzazione delle proprietà radiative;
- 3) la caratterizzazione delle proprietà radiative di superfici flessibili a prestazione ottica potenziata. Si tratta di superfici trasparenti a base polimerica (etilene tetrafluoroetilene, ETFE) trattate superficialmente e/o accoppiate ad ulteriori layer polimerici (la finalità è l'implementazione del potere selettivo o la riflettanza);
- 4) la definizione delle possibili implementazioni prestazionali del sistema di controllo solare per funzionalità aggiunte alla scala dell'edificio e alla meso-scala (identificazione di nuovi modelli di funzionamento);
- 5) la verifica dell'integrabilità di materiali a memoria di forma (smart material, SM) nei sistemi di protezione solare (sistemi *self adaptive* che non richiedono una attivazione elettrica e sistemi meccanici di movimentazione) con la definizione dei limiti applicativi e dei possibili modelli di funzionamento.
- 6) In riferimento ai punti 1 e 2 sono stati selezionati e raccolti 60 prodotti. Questi sono stati organizzati per macro tipologie: elementi a comportamento diffuso, elementi con geometria bidirezionale, elementi a geometria tridimensionali, pellicole. Per ogni singolo prodotto sono stati individuati i possibili campi di impiego (nel caso di prodotti innovativi o messi a punto in settori differenti da quello delle costruzioni), i limiti nell'applicazione (analisi delle proprietà meccaniche e chimico-fisico ove disponibili) e sono state effettuate le prime misure per la caratterizzazione ottico-radiativa. L'attività di caratterizzazione è consistita nella misura della riflettanza e della trasmittanza solare (25 campioni a texture complessa misurati con sfera integrata/apparato CATRAM nella lunghezza d'onda compresa fra 300 e 1700 nm e fra 300 e 2500 nm con spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950) e della trasmittanza luminosa. Questa prima campagna di misura ha permesso un'ulteriore selezione dei campioni (25 prodotti) escludendo tutti i materiali a prestazione energetica limitata.

Tutte le proprietà sono state raccolte in schede di "prestazione di prodotto" (archivio della prestazione delle protezioni solari innovative strutturato per una implementazione nel tempo).

In riferimento al punto 3 si è proceduto in prima istanza alla caratterizzazione ottica della pellicola di riferimento e all'accoppiamento di questo elemento con differenti pellicole (6 campioni) riflettenti e selettive (questa attività è stata preceduta da una caratterizzazione ottica delle pellicole attualmente in uso sulle superfici vetrate). La parte di ricerca attualmente in corso è relativa al deposito su pellicole di ETFE di alcuni trattamenti. Le attività sono di tipo esplorativo (nessuna valutazione viene effettuata in merito agli aspetti di stabilità e di compatibilità chimica nel tempo) e hanno lo scopo di comprendere: l'alterazione cromatica determinata dalla variazione della percentuale del pigmento presente nell'emulsione e l'alterazione delle proprietà ottiche e radiative (da considerarsi come elemento costituente delle protezioni solari e non come pellicola sostituita alle pellicole selettive in uso sulle vetrazioni).

Per quanto attiene al punto 4 e 5 si è proceduto alla determinazione delle potenziali nuove funzionalità dei sistemi di controllo solare. Nello specifico ci si è concentrati sui materiali a memoria di forma e sullo studio delle possibilità di integrazione nei sistemi di controllo solare (come attuatori, integrati parzialmente o totalmente per garantire una movimentazione senza l'ausilio di componenti meccanici). Lo studio ha permesso di identificare i limiti applicativi di questi sistemi e la definizione delle condizioni al contorno per l'attivazione (SM sotto forma di molla come attuatore nel caso di applicazione a breve termine su sistemi attualmente in uso).

Il rapporto RdS/2013/156 riporta una sintesi delle attività e fornisce una lettura comparativa, per parole chiave, della prestazione ottica offerta dai sistemi analizzati.

Aggiornamento e sviluppo di nuove funzionalità del software WinShelter (SSV)

Nell'ambito dell'attività di ricerca sopra citata sono state implementate nuove funzioni nel software WinShelter espandendo così il campo di applicazione dello strumento in termini di qualità del calcolo e di funzionalità. Per consentire l'implementazione delle nuove funzioni è stata necessaria una profonda revisione del database associato con il programma che lo rende non più compatibile con la precedente versione.

ENEA ha definito le caratteristiche di base dell'edificio di riferimento, ha svolto un'indagine per catalogare 30 nuovi componenti, verificato, anche con misure in laboratorio, i dati spettrali dei nuovi componenti inseriti nel database, definito l'algoritmo, che considera gli apporti esterni di energia forniti o estratti da una vetrata denominato "Esperto Winshelter" e verificato la funzionalità del sistema negli step del suo sviluppo.

Nel menu Opzioni->Impostazioni è ora possibile selezionare la lingua dell'interfaccia del programma. E' stata implementata, come opzione, la lingua inglese, ma l'aggiunta di ulteriori lingue è comunque semplice essendo basate su tabelle di conversione scritte in XML. Questo consentirà un utilizzo più corretto di WinShelter ad utenti che ne effettuino il download da nazioni estere.

Sono stati inseriti nel database i dati spettrali di alcuni componenti vetrati comunemente reperibili in commercio (resi generici e presentati sotto la categoria ASSOVETRO) e di alcuni dispositivi di schermatura solare (resi generici e presentati sotto la categoria ASSITES). Utilizzando questi elementi "precalcolati" o caricando nel database, con l'apposita funzione, nuovi elementi associati a dati spettrali l'utente può usufruire della più corretta modalità di calcolo prevista dalla norma EN 13363-2.

Un pulsante nell'interfaccia permette di filtrare dal database i prodotti con associati dati spettrali. Sono stati inseriti 30 materiali con dati spettrali, tra componenti vetrati e schermature solari. Per consentire la visualizzazione dei dati spettrali inseriti o il risultato del calcolo di WinShelter è stata aggiunta una routine grafica user friendly.

E' stata inserita una modalità di calcolo, provvisoriamente chiamata "Esperto Winshelter", basata su un algoritmo che modifica la procedura prevista dalle norme EN13363-2 e ISO15099 e consente di tenere in considerazione apporti "esterni" di energia forniti a o estratti da una vetrata. Questo dovrebbe consentire, in maniera semplificata, una migliore valutazione del fattore solare e della trasmittanza termica di vetrate riscaldate o vetri fotovoltaici e BIPV sulla base delle caratteristiche ottiche e del rendimento di trasformazione elettrica del sistema.

E' stata aggiunta al programma una nuova funzionalità per la classificazione energetica dei serramenti in riscaldamento o raffrescamento che implementa la procedura della norma ISO 18292-2008 a partire da: dati climatici della zona climatica in esame; caratteristiche di base dell'edificio di riferimento; caratteristiche termofisiche del serramento (trasmittanza termica, fattore solare, permeabilità all'aria). I dati delle caratteristiche climatiche (UNI 10349), delle caratteristiche dell'edificio di riferimento e dei coefficienti di utilizzo degli apporti solari per le varie province italiane sono pre-caricati nel database. I risultati sono visualizzabili in forma numerica o grafica.

e. Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool material)

e.1 Caratterizzazione della riflettanza solare a seguito d invecchiamento e sporcamento accelerato e confronto con l'esposizione naturale

La ricerca, che costituisce il proseguimento di attività avviate nella precedente annualità, prevede lo studio dell'andamento nel tempo della riflettanza solare di prodotti per coperture di edifici sottoposti a invecchiamento naturale e la determinazione di una procedura di sporcamento accelerato replicabile. E' stata effettuata una prima validazione della procedura grazie al confronto fra i dati ottenuti con lo sporcamento accelerato e con il primo anno di esposizione naturale.

Nell'aprile 2012 sono stati selezionati e esposti in ambiente urbano (a Milano e a Roma) 16 prodotti per coperture (di cui 14 membrane impermeabilizzanti sia sintetiche che bituminose e 2 tegole tipo olandese). Sono stati selezionati prodotti aventi proprietà "standard" (rappresentativi delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio) e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, cioè ad alta riflettanza o fotocatalitici. Per ogni prodotto, sito e condizione di esposizione, sono stati esposti tre campioni, dei quali, al tempo zero e dopo tre, sei, e dodici mesi di esposizione naturale, è stata misurata la riflettanza spettrale con uno spettrometro UV-VIS-NIR e sono stati calcolati i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso secondo la norma ISO 9050 (le misure al tempo zero e dopo tre mesi sono state effettuate nell'annualità precedente). Per i prodotti con riflettanza solare iniziale maggiore di 0,70 è stato osservato un decremento anche del 15% dopo soli tre mesi, mentre per prodotti con riflettanza solare iniziale minore di 0,40 sono state osservate variazioni modeste. Dopo un anno di esposizione naturale a Milano sono stati osservati deprezzamenti dell'ordine del 30% della riflettanza solare iniziale per membrane con riflettanza iniziale maggiore di 0,80, mentre a Roma, per le stesse membrane, è stata osservata una riduzione del 20%..

E' stata condotta anche una campagna di invecchiamento e sporcamento accelerato in laboratorio con la procedura sviluppata al Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)³². Questa prima campagna di prove è stata condotta sulle stesse membrane esposte in ambiente urbano, trovando una buona correlazione sia in termini di distribuzione spettrale che di valori integrati. La procedura sviluppata dal LBNL è stata progettata per riprodurre lo sporcamento dopo tre anni di esposizione presso tre siti non urbani negli USA (in Arizona, Florida, e Ohio). Si può comunque osservare un buon raccordo con i dati relativi ai sei mesi di esposizione a Roma e Milano. La procedura accelerata è stata quindi affinata aumentando l'intensità dello sporcamento per meglio simulare la deposizione e l'adesione dello sporco alla superficie esterna dell'involucro degli edifici in aree metropolitane come quelle italiane. Sono state inoltre testate diverse miscele per lo sporcamento e diversi apparati di prova. In particolare, si nota come i decrementi di riflettanza misurati per i prodotti esposti presso i siti del Cool Roofing Rating Council negli USA dopo tre anni di invecchiamento, a Roma e Milano, si misurano dopo soli 6-12 mesi.

Il rapporto RdS/2013/159 riporta l'evoluzione del decadimento prestazionale dei campioni e la variante della procedura di sporcamento e invecchiamento accelerato di materiali a partire dal protocollo di sporcamento sviluppato dall'Heat Island Group del Lawrence Berkeley National Laboratory.

e.2 Fotometria e goniofotometria di materiali da costruzione

Nell'ambito della collaborazione con INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) è stata condotta una campagna sperimentale di misurazione della funzione di riflessione bi-direzionale di 15 di campioni di materiali opachi per applicazioni in edilizia. Le tipologie di prodotto includono: rivestimenti elastomerici, membrane bituminose, gres porcellanato, cotto, materiali lapidei.

In questa prima fase, tendente a identificare le principali caratteristiche per tipologia di prodotto, la misura del fattore di riflessione bi-direzionale ha considerato 4 angoli di incidenza (8°, 30°, 45° e 60°) e il piano di diffusione della radiazione comprendente la direzione di incidenza, in modo da evidenziare il cambio di comportamento (da diffuso a speculare) all'aumentare dell'inclinazione dei raggi solari con un numero relativamente ridotto di misure e considerando la radiazione visibile.

In base a risultati sperimentali ottenuti sono state costruite delle ipotesi di curve angolari complete per ogni campione misurato. Per ottenere queste curve, oltre ai risultati di ENEA sul fattore di riflessione globale ottenuto mediante misurazioni con sfera integratrice, è stata applicata una metodologia semplificata di estrapolazione e una corretta integrazione dei dati spaziali.

Dalle curve così ottenute sono stati estratti i valori del fattore di riflessione diffuso e speculare al variare dell'angolo di incidenza, permettendo una prima classificazione delle caratteristiche ottiche dei campioni.

In futuro verranno confrontati i risultati della simulazione con misurazioni complete in modo da stimare l'accuratezza dell'approccio ed estendere le possibilità della simulazione a qualsiasi tipologia di prodotto e con un numero ragionevolmente ridotto di misure iniziali, alla portata anche di laboratori industriali, o considerando anche la regione spettrale del vicino infrarosso.

L'attività svolta è descritta nel rapporto RdS/2013/157.

³² M. Sleiman, H. Destailats, T. Kirchstetter, H. Gilbert, P. Berdahl, H. Akbari, L. Marlot, S. Quelen, C. Preble, M. Spears, G. Ban-Weiss, R. Levinson.. Accelerated Aging Protocols for Roofing Materials: Version 1.0, in Proc. of International Workshop on Advances in Cool Roof Research, Berkeley, CA - July 28 -29, 2011

e.3 Caratterizzazione e valutazione di pavimentazioni riflettenti per applicazioni urbane

I “cool material” trovano applicazione nel rivestimento degli edifici e in particolare dei tetti, ma possono essere anche usati per pavimentazioni urbane. Si tratta di materiali caratterizzati da elevata riflettanza solare, ottenuta sia attraverso tinte chiare, sia attraverso nuove tecnologie, associabili anche a colori più scuri, volte a potenziare il potere di riflessione del materiale nell’infrarosso vicino. Un’elevata riflettanza permette di limitare l’innalzamento della loro temperatura superficiale quando sottoposti a carichi solari. Un’alta emissività inoltre determina un più favorevole rilascio termico in fase notturna del calore immagazzinato durante le ore diurne. Queste caratteristiche influiscono sulla riduzione del flusso di calore trasmesso verso l’interno di un edificio e, nel caso di un’applicazione su pavimentazione urbana, sulla riduzione del calore rilasciato all’ambiente esterno per convezione. Mentre i “cool material” usati come rivestimento per i tetti, i “cool roof”, sono ormai una tecnologia consolidata, la stessa cosa non si può ancora affermare per i “cool pavement”. Ciò è determinato dal fatto che lo sviluppo tecnologico risulta essere in quest’ultimo caso più complesso dovendo soddisfare specifiche non solo ottiche e termiche, ma anche meccaniche.

I “cool pavement” possono essere concepiti sia come tinte da applicare direttamente sull’asfalto esistente, sia come materiali composti da calcestruzzo che accoppiano un’elevata riflettanza, superiore a quella degli asfalti convenzionali, ad una struttura permeabile all’acqua. In particolare questi ultimi, oltre alle proprietà derivanti da un alto potere di riflessione, consentono di sfruttare il fenomeno dell’evaporazione dell’acqua accumulata all’interno delle loro cavità limitando l’energia termica destinata all’incremento della temperatura superficiale.

L’analisi sperimentale condotta in questo studio è incentrata su una caratterizzazione ottica di quattro prodotti a base di calcestruzzo drenante usato per la pavimentazione stradale. Al fine di confrontare le proprietà di riflessione con quelle dell’asfalto convenzionale, sono state testate anche due tipologie di asfalti: uno appena posato, uniformemente ricoperto di conglomerato bituminoso e uno più datato la cui superficie appare decisamente più chiara e tendente al grigio scuro. La riflettanza nello spettro solare (300-2500 nm) è stata misurata mediante spettrofotometria. I campioni testati e i rispettivi valori di riflettanza integrati nello spettro solare, visibile e N.I.R., ottenuti a partire dalle misure secondo la procedura definita nella ISO 9050 2003, sono riportati in Tabella 89.

Tabella 89. Valori integrati di riflettanza dei calcestruzzi drenanti e degli asfalti convenzionali

	ρ_e	ρ_{NIR}	ρ_v	$\rho_e \cdot \rho_e$ asf. nuovo	$\rho_e \cdot \rho_e$ asf. datato
Bianco-Dimensione Grani 6 mm	45	46	46	41	29
Bianco-Dimensione Grani 12 mm	56	56	57	51	39
Grigio chiaro-Dimensione Grani 12 mm	30	31	31	26	14
Grigio scuro-Dimensione Grani 12 mm	22	23	23	18	6
Asfalto nuovo	5	7	3	---	---
Asfalto datato	17	20	14	---	---

In base ai dati esposti nella tabella si nota come la riflettanza nell’infrarosso vicino sia all’incirca identica a quella nella banda del visibile per tutti i campioni. Questo fattore indica che i prodotti testati non hanno un rilevante comportamento selettivo nella regione dell’infrarosso vicino. Ci sono quindi margini per incrementare ancora maggiormente la riflettanza solare senza alterare la resa cromatica attuale, cosa attuabile incrementando il potere di riflessione nel N.I.R. e mantenendo inalterato quello nella banda del visibile.

Le prestazioni dei prodotti oggetto di studio sono state investigate attraverso un’analisi numerica. Il software ENVI-met è stato utilizzato per valutare i possibili vantaggi termici, legati all’applicazione di una pavimentazione in calcestruzzo, sulle temperature esterne di un agglomerato urbano confrontandole con quelle ottenute con un asfalto convenzionale. Grazie all’interfaccia grafica del software è stato possibile ricreare nel dominio di calcolo intere porzioni di aree urbane modellando edifici, strade e vegetazione. L’interfaccia con l’utente ha permesso inoltre di modificare le caratteristiche ottiche e termiche delle superfici in gioco come, ad esempio, la temperatura di set-point interno degli edifici, la loro trasmittanza termica, la riflettanza e l’emissività.

Il quartiere scelto per lo studio è una porzione di Prati, un’area densamente urbanizzata di circa 580.000 m² collocata al centro di Roma. Modificando l’albedo della pavimentazione, il decremento massimo di temperatura, ottenuto sostituendo l’asfalto convenzionale con il calcestruzzo drenante, ha raggiunto i 3,3 °C nelle ore di picco di un giorno primaverile e 4,4 °C nelle ore di picco di un giorno estivo. Questa differenza si mantiene inoltre costante anche oltre l’altezza media degli edifici. I calcestruzzi grigio e bianco rimangono quindi più freschi sotto il sole, a causa del loro alto fattore di riflessione. La loro temperatura superficiale si attesta a valori più bassi rispetto all’asfalto convenzionale. Una minore temperatura superficiale induce un minor scambio termico convettivo e

radiativo con l'aria avendo come effetto una riduzione del valore di temperatura di quest'ultima. L'uso massiccio di questa tecnologia innovativa combinato con un aumento delle aree verdi porterebbe ad una sostanziale diminuzione dell'effetto isola di calore urbana con sensibili aumenti relativi al livello di comfort termico per la popolazione e ad un abbattimento dei consumi energetici per gli usi finali negli edifici.

L'attività svolta è descritta nel rapporto RdS/2013/166.

f. Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni

Tutte le linee in cui è strutturato l'obiettivo sono state sviluppate da ENEA.

f.1 Piano integrato di comunicazione e diffusione

Il Progetto, partendo dalla recente Direttiva 27/2012/CE, che rimarca il ruolo determinante dell'efficienza energetica (EE) nel settore del civile e la necessità di un'azione esemplare da parte del Settore Pubblico per l'implementazione della Direttiva, intende sviluppare tecnologie, modelli e strumenti di supporto alla realizzazione di interventi di EE sul patrimonio immobiliare del Settore Pubblico.

Tale Progetto fornisce una serie di prodotti la cui efficacia reale è legata, soprattutto, alla possibilità concreta che essi possano essere conosciuti, valutati ed applicati da parte dei soggetti coinvolti a vario titolo nel processo di innovazione (Figura 406).

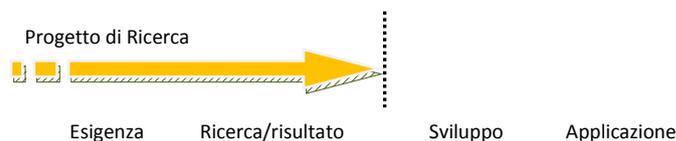


Figura 406. Processo di innovazione

Per tale motivo risultano necessarie azioni di diffusione e divulgazione del Progetto e dei relativi prodotti per far conoscere ai diversi soggetti/attori interessati quanto reso disponibile dal settore della ricerca e sperimentazione, fino a raggiungere gli utilizzatori finali dei diversi prodotti capaci di assicurare l'applicazione ed il reale soddisfacimento delle esigenze.

Il documento RdS/2013/161 si pone in tale direzione assumendo una doppia valenza. Da una parte, esso propone una riflessione sull'importanza della diffusione dei prodotti della ricerca che possa configurarsi come un riferimento per i diversi partner del Programma di ricerca. Dall'altra presenta un piano integrato di comunicazione e diffusione dei risultati del progetto.

Il documento si articola nei seguenti punti:

- la diffusione dei risultati della ricerca: un processo necessario;
- la diffusione di tecnologie e strumenti per l'efficienza energetica e il ruolo esemplare del Settore Pubblico: stato dell'arte;
- i contenuti del progetto di ricerca;
- il Piano Integrato di Comunicazione e Diffusione
- l'individuazione degli obiettivi di comunicazione;
- l'individuazione dei pubblici di riferimento;
- il modello di diffusione;
- metodologia per l'implementazione;
- l'individuazione delle azioni e degli strumenti di comunicazione;
- la misurazione dei risultati

f.2 Utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'efficienza energetica

L'articolo 5 della Direttiva Energy Service (ESD) impone al Settore Pubblico (SP) degli Stati Membri tre compiti cruciali:

- attuare misure di miglioramento dell'efficienza energetica,
- comunicare queste azioni ed i relativi risultati per promuovere l'EE presso i cittadini e le aziende,
- includere l'efficienza energetica come criterio negli appalti pubblici.

Per assolvere a tali impegni occorre una profonda conoscenza ed esperienza sull'argomento e, a tal fine, è necessario prevedere percorsi formativi specifici destinati al Settore Pubblico.

Il rapporto RdS/2013/162 è dedicato al ruolo e all'importanza della formazione del personale del Settore Pubblico nell'attuazione degli obiettivi imposti dalla Direttiva Energy Service ed all'utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'efficienza energetica. Gli obiettivi dello studio sono stati i seguenti:

- riconoscere che la formazione del personale del Settore Pubblico può giocare un ruolo esemplare per l'attuazione della ESD;
- presentare lo stato dell'arte della formazione in Italia e in diversi Stati Membri,
- presentare i criteri per la progettazione e valutazione di un percorso formativo in modalità blended dedicato all'EE nella PA;
- Presentare Energy City Learning: un ambiente virtuale per l'apprendimento dell'EE.

f.3 Specifiche tecniche per la realizzazione del Modello offline "Energy City Virtual Lab"

Sono state predisposte le specifiche tecniche della piattaforma web "Energy City Virtual Lab" (rapporto RdS/2013/163). La piattaforma, prevista dal Piano Integrato di Comunicazione e Diffusione, si configura come un laboratorio virtuale dedicato all'efficienza energetica, un luogo della rete organizzato come una struttura urbana in senso fisico, diviso in aree dedicate alle diverse tipologie di utenti.

All'interno di tale contenitore troveranno spazio:

- edifici virtuali dove ricercatori e soggetti destinatari potranno interagire in tempo reale mostrando e condividendo i risultati e le possibili applicazioni delle sperimentazioni (modelli, codici, software, etc.);
- una piazza virtuale per convegni e meeting con la possibilità di organizzare anche eventi a distanza;
- materiale video da realizzare relativo alle singole linee di ricerca (documentari, interviste ai ricercatori, etc.);
- una biblioteca virtuale contenente materiale bibliografico collegato alle diverse ricerche;
- aule virtuali dove verranno svolti in modalità e-Learning corsi rivolti a tecnici della PA, operatori di settore e studenti di Istituti superiori di secondo grado o università.
-

Inoltre la Piattaforma conterrà le seguenti funzioni:

- presenterà l'offerta complessiva della Piattaforma che comprende: procedura di login, menù dinamico (congruente con il profilo dell'utente collegato), newsletter, accesso all'area riservata ai partner ed un riferimento al finanziamento da parte della Ricerca di Sistema.
- procedura di gestione degli utenti, sistema di classificazione, registrazione, cancellazione e modifica degli utenti
- repository di documenti, sistema di classificazione dei documenti e dei materiali del progetto, gestione dei documenti in base agli utenti, funzioni di download, upload, search, cancella, modifica.
- Ulteriori utilities a supporto del sito:
 - News
 - Contact us
 - Search
 - Site map.
- Indicatori di monitoraggio:
 - Numero di visitatori mensili fino alla fine del progetto
 - Numero di iscritti alla newsletter-mailing list.

I principali obiettivi della Piattaforma sono:

- descrivere gli aspetti principali del progetto (obiettivi, attività, risultati, ecc.);
- mostrare e condividere i risultati ed i prodotti del progetto;
- fornire supporto ai diversi attori coinvolti ed agli utenti.

Un altro importante obiettivo è quello di dare supporto alle funzioni di project management (gestione della documentazione di progetto, stato di avanzamento delle attività, ecc.).

Per raggiungere tali obiettivi la Piattaforma sarà divisa in due aree:

- area pubblica: contenente le informazioni generali sul progetto e sui prodotti di ricerca;

- area riservata (con accesso riservato agli utenti registrati): con informazioni più dettagliate e specifiche del progetto. Tutte le funzioni di networking, comunicazione, aggiornamento e formazione prevedono un accesso riservato.

f.4 Rapporto sul Labelling degli Elettrodomestici

Nell'ambito della definizione dei consumi energetici sono stati presi in esame in particolare quelli dovuti agli apparecchi che incidono sui consumi nel settore civile, con particolare riferimento ai grandi elettrodomestici (lavastoviglie, lavatrice, frigorifero), agli apparecchi per la cottura (forni, piani cottura, cappe aspiranti), a quelli per il condizionamento (condizionatori d'aria, sistemi per la ventilazione) e ai sistemi per il riscaldamento degli ambienti (boiler) e la produzione dell'acqua calda sanitaria e più recentemente gli apparecchi utilizzati in ambito commerciale e professionale (frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie, cappe per cucina) e per l'illuminazione.

Questa attività vede il coinvolgimento del nostro sistema Paese a supporto dell'industria nazionale e del Ministero Sviluppo Economico sia in stretta collaborazione con la Commissione Europea DG Energia (e più recentemente anche la DG Impresa) per la messa a punto delle politiche di efficienza energetica (requisiti minimi di immissione sul mercato ed etichettatura energetica) nell'ambito delle direttive quadro ecodesign 2009/125/EC ed etichettatura energetica 2010/30/EU.

Si tenga presente che l'Italia non solo è uno dei maggiori produttori di elettrodomestici a livello UE e persino mondiale, ma è molto attiva nei Comitati europei che gestiscono la preparazione delle misure attuative delle due direttive quadro. In particolare ENEA ha svolto diversi studi su frigoriferi, congelatori e lavatrici e lavastoviglie per supportare la competitività delle nostre aziende del settore e collabora all'individuazione dei parametri tecnici che sono alla base dei Regolamenti specifici di attuazione delle due direttive quadro della Commissione Europea.

D'altro canto le Direttive 2010/31/UE e 2012/27/UE prevedono che i consumi finali degli apparecchi domestici possano essere considerati nella definizione della prestazione energetica degli edifici del residenziale e quindi risulta necessario predisporre nuove proposte legislative, in risposta a quanto richiesto dalle Direttive.

Il biennio 2013-2014 sarà un periodo particolarmente importante per il miglioramento dell'efficienza energetica degli apparecchi domestici, professionali e commerciali. Si prevede, infatti, che entro fine anno saranno stati emanati o saranno stati predisposti per la successiva emanazione da parte della Commissione Europea, una serie di Regolamenti che incideranno in modo significativo sulla qualità prestazionale degli apparecchi e sul contenimento dei consumi da questi causati nei Paesi UE.

Le attività previste nel PAR 2012 sono finalizzate alla definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica per gli apparecchi domestici, professionali e commerciali, in particolare nel settore della refrigerazione, del lavaggio, della cottura, del condizionamento/riscaldamento e dell'illuminazione tenendo conto che tali apparecchi sono presenti non solo nelle abitazioni residenziali ma anche nella PA soprattutto nelle mense scolastiche, nei centri sportivi e nel Social Housing e, pertanto, rientrano, anche nell'ambito della definizione dei consumi energetici, nella specifiche di questa attività.

I dati forniti dalla Commissione Europea mostrano elevati potenziali di risparmio energetico al 2020 derivanti dall'introduzione di miglioramenti tecnologici conseguenti all'entrata in vigore dello schema di etichettatura energetica e dei requisiti minimi di efficienza energetica. In particolare:

- Frigoriferi e congelatori: il consumo di energia previsto al 2005 era di 122 TWh, previsto in riduzione al 2020, ma ancora con un potenziale di risparmio di 6 TWh;
- Lavatrici: il consumo di energia previsto al 2020 è di 37,7 TWh e 2 051 milioni di m³ di acqua con un potenziale di risparmio di circa il 5-10%;
- Lavastoviglie: il consumo di energia previsto al 2020 è di 35 TWh, con un potenziale di risparmio di circa il 5-10%;
- Condizionatori d'aria: il consumo di energia previsto al 2020 è di 74 TWh, con un potenziale di risparmio di 11 TWh;
- Cappe per cucina, forni e piastre di cottura: il consumo di energia al 2020 è di 779 PJ, con un potenziale di risparmio di 27 PJ;
- Refrigerazione commerciale: il consumo di energia previsto al 2020 è di 9,4 TWh, con un potenziale di risparmio di 1,8 TWh.

L'output di questa attività sarà utilizzata per la successiva emanazione, di documenti e provvedimenti, da parte della UE e del nostro Paese, che incideranno in modo significativo sulla qualità prestazionale degli apparecchi e sul contenimento dei consumi da questi causati nel settore domestico, professionale, commerciale e nella PA.

Le attività svolte nell'ambito di questa linea sono descritte nel rapporto RdS/2013/164.

f.5 Strumento di supporto al consumatore finale per un utilizzo consapevole e razionale dell'energia (utenze elettriche nelle abitazioni)

La diffusione di apparecchiature elettriche unita all'adozione, da parte dei consumatori, di comportamenti poco consapevoli e spesso energivori, hanno fatto sì che le spese per le forniture energetiche pesino in maniera sempre più importante sul bilancio delle famiglie.

Il tool sviluppato da ENEA (rapporto RdS/2013/165) vuole essere uno strumento che mira a rendere esplicite le modalità con cui viene a definirsi la spesa per le utenze (solo elettriche), facendo così emergere il peso che hanno le scelte che ciascuno di noi prende ogni giorno sul modo di utilizzare gli elettrodomestici e le apparecchiature presenti in casa. La metodologia utilizzata si articola in tre step che partono dalla stima dei consumi energetici (elettrici) nella situazione di partenza, fino ad arrivare a quantificare il risparmio economico, energetico ed ambientale che sarebbe possibile ottenere a costo zero, semplicemente modificando le abitudini relative a "quanto" e "quando" utilizziamo le apparecchiature elettriche presenti in casa.

Gli step sono sostanzialmente tre:

- audit energetico;
- analisi degli effetti dell'adozione di comportamenti maggiormente virtuosi (livelli di utilizzo delle apparecchiature);
- quantificazione dell'impatto di un diverso utilizzo delle apparecchiature nell'arco della giornata (modifica delle fasce orarie di utilizzo).

Ad ogni step è associata una valutazione in termini energetici, economici e di emissioni di CO₂. Al fine di orientare le scelte degli utenti verso comportamenti maggiormente virtuosi, vengono di volta in volta evidenziate le differenze, in termini di spesa e di emissioni, rispetto ad un consumatore di "riferimento" maggiormente virtuoso.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnico di Milano Dipartimento di Energetica eERG (rif. Obiettivo a)

Le attività sviluppate dal Politecnico di Milano hanno riguardato la definizione di parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi/benefici da utilizzare nella metodologia comparativa. L'attività si inserisce nella definizione dei parametri e di nuovi indicatori da utilizzare per lo sviluppo della metodologia comparativa promossa dalla UE.

Politecnico di Milano, Dipartimento ABC (rif. Obiettivo a,d,e)

Lo studio ha riguardato la definizione di standard e soluzioni per l'involucro e gli impianti tecnologici per la realizzazione di interventi in edifici esistenti, ad altissima prestazione energetica, in cui il fabbisogno energetico (molto basso o quasi nullo) dovrà essere coperto in misura significativa da energia ottenuta da fonti rinnovabili, in riferimento a quanto prescritto dalla Direttiva Europea 2010/31/CE (EPBD recast). Sono stati effettuati per:

- *obiettivo a*: l'analisi dei dati di consumo elettrico, rilevati in tempo reale e archiviati per l'annualità 2012 tramite apposito software di acquisizione in remoto, dei 60 edifici costituenti i campus di Città Studi e Bovisa del Politecnico di Milano; lo sviluppo di una metodologia per la definizione dei consumi energetici in edifici del terziario; lo sviluppo di linee guida per la stesura di contratti di rendimento energetico per le PA;
- *obiettivo d*: lo studio di sistemi per il controllo della radiazione solare incidente su superfici d'involucro trasparente (ipotesi d'implementazione della prestazione di prodotti in uso o analisi di prodotti innovativi per il settore delle costruzioni, ma in uso in altri settori con funzionalità differenti) o sistemi adattivi (nella forma e nella prestazione);
- *obiettivo e*: lo sviluppo di un protocollo per lo sporco e l'invecchiamento accelerati (in laboratorio) dei materiali per l'involucro edilizio.

Le attività hanno fatto riferimento a quelle dell'Annex 56 "Cost Effective Energy and GHG Optimization In Building Renovation" dell'Implementing Agreement Energy Conservation in Building and Community Systems della International Energy Agency.

Politecnico di Torino - Dipartimento di Energetica (rif. Obiettivo a)

Le attività hanno riguardato tre distinti temi: la definizione dei parametri energetici da utilizzare per la metodologia comparativa, prevista dalla Direttiva 32/2010/CE, per la valutazione degli standard nazionali per la certificazione energetica degli edifici previsti dal quadro normativo vigente tenendo conto anche del parametro costi/benefici; le potenzialità di impiego dei modelli inversi per lo studio dei consumi energetici e l'influenza del

comportamento degli occupanti sui consumi stessi, con modelli predittivi diretti che indiretti (data-driven), al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure per l'efficienza energetica; lo sviluppo di uno strumento per la verifica degli obiettivi da raggiungere e delle politiche di risparmio energetico applicate a scala di territorio e di grande patrimonio edilizio.

Università di Bari, Dipartimento Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) (rif. Obiettivo e)

L'Università di Bari ha sviluppato un modello energetico e definito metodologie finalizzate all'incremento dell'efficienza energetica di edifici ricoperti con essenze vegetali con particolare riguardo alla "sostenibilità" dell'edificio in ambiente mediterraneo. A tal fine sono stati considerati sistemi verdi posizionati sia lungo le pareti verticali sia sul tetto dell'edificio. Sono stati definiti i parametri, che nel modello energetico, rappresentano il microclima di un edificio ricoperto con essenze vegetali posizionato nell'area climatica del Mediterraneo allo scopo di evidenziare gli scambi energetici di tipo convettivo, conduttivo e radiativo tra l'edificio, il sistema vegetale e l'ambiente.

Università di Pisa, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agro-ambientali (rif. Obiettivo d)

E' stata svolta una ricerca per determinare le specie vegetali che appaiono più adatte alle coperture verdi in ambiente mediterraneo sulla base di esperimenti finalizzati alla conoscenza del comportamento fisiologico delle essenze vegetali nelle condizioni (simulate) tipiche delle coperture verdi, dove le piante si trovano in condizioni di deficit idrico e minerale.

Università di Pisa, Dipartimento Energetica (rif. Obiettivo a)

Le attività sviluppate dall'Università di Pisa sono state finalizzate a sviluppare un software per l'audit energetico negli edifici del civile, residenziale e non residenziale. Il SW ha tenuto conto della metodologia sviluppata nella precedente annualità, degli ultimi decreti normativi varati e delle norme tecniche relative (UNITS 11300 parte 1,2 e 3). La messa a punto di questo strumento ha richiesto un approfondito lavoro di studio e ricerca per cercare di mettere a punto uno strumento "semplice" da utilizzare pur nella complessità per gli aspetti che investono le raccomandazioni della certificazione energetica degli edifici e per quanto viene richiesto dal DLgs 115/09. Questo strumento potrà essere utilizzato, per interventi di audit energetico per la riqualificazione del patrimonio edilizio pubblico.

Università di Palermo, Dipartimento dell'Energia (rif. Obiettivo a)

Il Dipartimento dell'Energia (già DREAM - Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali) dell'Università di Palermo partecipa attivamente da tempo con i propri esperti al Gruppo di lavoro del progetto "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" dell'Agenzia Internazionale dell'Energia; il progetto è una ricerca congiunta tra l'Annex 52 dell'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building Communities Systems" e il Task 40 dell'Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling". Il Dipartimento ha svolto anche una prima indagine sul parco edilizio scolastico della regione Sicilia.

Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (rif. Obiettivo a)

Le attività di ricerca hanno riguardato un'indagine sui consumi e sugli interventi di risparmio energetico negli impianti natatori gestiti dal CONI Servizi e in alcune piscine private, in diverse zone climatiche, per ricercare alcune relazioni tra zone, impianti, sistemi, dimensioni, metodologie di gestione e consumi.

Una seconda linea di attività ha riguardato l'analisi valutativa delle metodologie di diagnosi energetica in ambito illuminotecnico, semplificate e complesse, a partire da quanto proposto nella UNI EN 15193, per edifici del settore residenziale e terziario, per determinare l'accuratezza di ciascuna proposta, nell'ottica di un miglioramento della qualità ambientale e della sostenibilità energetica, con l'obiettivo di individuare la metodologia più adatta per l'implementazione in un software di calcolo.

Università La Sapienza di Roma, Centro Ricerche C.I.T.E.R.A (rif. Obiettivo a)

Le attività per il primo anno sono state indirizzate, a seguito di un'analisi del parco immobiliare degli edifici pubblici della provincia di Roma, nella individuazione di un edificio scolastico sul quale si è sviluppata una attività per la definizione di un lay-out di progetto per la riqualificazione energetico-ambientale dell'edificio. Con la Provincia di Roma si sono definite le modalità per l'utilizzo di un contratto di garanzia di prestazione energetica e quelle per l'espletamento di una gara d'appalto.

Politecnica delle Marche, Dipartimento di Energetica (rif. Obiettivo c)

Questa attività ha raggiunto l'obiettivo della creazione dell'anno solare caratteristico per le province italiane e l'aggiornamento dei dati climatici della UNI 10349.

La revisione della norma UNI 10349 risulta essere un riferimento importante per l'applicazione delle procedure per i calcoli dei fabbisogni energetici degli edifici e per le valutazioni energetiche da effettuare per l'utilizzo delle fonti rinnovabili (solare termico e solare fotovoltaico).

Come previsto dal Piano Annuale di Realizzazione, sono stati avviati dei contratti di ricerca con alcuni operatori per la compiuta esecuzione delle attività, in particolare:

Centro Ricerche CRESME (rif. Obiettivo b)

Il CRESME ha continuato l'attività di ricerca ed indagine per la definizione del parco immobiliare del settore del pubblico (scuole e uffici) e dei relativi consumi energetici. È stata definita la consistenza degli edifici di queste destinazioni d'uso, ne è stata caratterizzata la distribuzione sul territorio e le caratteristiche tipologiche costruttive ed impiantistiche, i consumi energetici da bolletta. Lo studio ha fornito dati e caratteristiche degli edifici necessarie per definire l'edificio tipo richiesto dalla Direttiva 31/2010/CE per l'applicazione della metodologia comparativa.

Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia, FIRE (rif. Obiettivo b)

La FIRE ha sviluppato una ricerca finalizzata a mettere a disposizione delle PA modalità e procedure per poter utilizzare finanziamenti tramite terzi negli interventi di riqualificazione energetica. Sono state prodotte linee guida che si confida possano aiutare le Amministrazioni, che devono effettuare interventi di efficienza energetica, alla predisposizione di contratti EPT e al ricorso a FFT, anche sfruttando gli incentivi nazionali (conto termico, Titoli Efficienza Energetica ecc.), Regionali o Locali disponibili.

Comitato Termotecnico Italiano, CTI (rif. Obiettivo a)

Il CTI ha svolto una ricerca per la messa a punto di un sistema esperto a supporto della PA per agevolare le valutazioni sulle scelte e gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici a cui dare priorità riducendo il ricorso a consulenze esterne e accrescendo la capacità dei funzionari della PA. Il sistema esperto vuole fornire agli Amministratori/tecnici degli strumenti che consentano loro di approcciare il problema, di inquadrare, almeno in prima istanza, gli aspetti più importanti, tecnici e tecnologici, in modo da creare un livello di confidenza e conoscenza sul tema necessario per avviare il percorso costruttivo per gli interventi di efficientamento degli edifici.

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - INRIM (rif. Obiettivo e)

L'INRIM, che svolge funzioni di Istituto metrologico, ha effettuato delle analisi sperimentali per la caratterizzazione di materiali innovativi e convenzionali. La ricerca ha previsto un'analisi sperimentale per determinare le caratteristiche di riflettanza solare e di albedo dei materiali da costruzione in funzione del loro comportamento goniofotometrico. Sono state quindi condotte delle campagne sperimentali per la misurazione della funzione bi-direzionale di una serie di campioni di materiali per l'edilizia, quali rivestimenti elastomerici, gres porcellanato, membrane bituminose, materiali lapidei, etc..

Stazione Sperimentale del Vetro, SSV (rif. Obiettivo d)

La ricerca è finalizzata all'aggiornamento e all'implementazione del software WINSHELTER (WINDOWS and SHADING Energy Lighting and Thermal Evaluation Routine), sviluppato nell'ambito della Ricerca di Sistema nelle precedenti annualità. WINSHELTER è uno strumento di calcolo per la caratterizzazione dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio, dedicato ad un ampio ventaglio di figure professionali e non: specialisti di fisica dell'edificio ed efficienza energetica, consulenti energetici, progettisti di edifici e facciate, tecnici, operatori del settore industriale, certificatori energetici, mondo accademico e studenti.

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Lo scenario nel quale s'inquadra il presente progetto vede un aumento della produzione energetica mondiale a costi via via crescenti e un sempre più forte impatto sull'ecosistema a livello mondiale dell'inquinamento e dei cambiamenti climatici connessi con le tecnologie di produzione dell'energia attualmente utilizzate. In particolare, il consumo di fonti primarie, quali i combustibili fossili, gasolio e gas, per il riscaldamento e la climatizzazione, impone una riflessione per la tutela e la preservazione dell'ambiente per le generazioni future, oltre che per i rilevanti costi connessi.

Scopo del progetto, che è la naturale prosecuzione di quanto realizzato nelle precedenti annualità, è principalmente quello di incrementare il livello di sostenibilità energetica del comparto residenziale, intendendo con il termine sostenibilità energetica la produzione e lo sfruttamento dell'energia in modo da consentire un miglioramento ambientale e socio-economico sia per la singola utenza, sia per il sistema (produttivo e utilizzatore) globale.

A livello quantitativo, il comparto residenziale è responsabile del 40% del consumo energetico globale nell'Unione Europea (secondo la Direttiva Europea 2010/31/UE del 19 maggio 2010). Per questo motivo, come riportato nella medesima Direttiva, "la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono misure importanti e necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas a effetto serra".

Un'ulteriore problematica legata alle richieste energetiche del comparto residenziale risiede nella crescente proliferazione di impianti di condizionamento dell'aria in tutti i paesi industrializzati. Questo, come ancora riportato nella direttiva succitata, "pone gravi problemi di carico massimo, (in particolare nel periodo estivo, quando più in generale, aumentano anche le necessità di alimentazione della catena del freddo) che causano un incremento del costo dell'energia elettrica e uno squilibrio del bilancio energetico". Per ridurre tali problematiche, oltre agli interventi suggeriti dalla Direttiva citata, finalizzati al miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici durante il periodo estivo, si deve promuovere un uso razionale e maggiormente responsabile delle fonti energetiche (rinnovabili e non) disponibili.

Per questi motivi, si è deciso di indirizzare il presente progetto verso l'approfondimento di quelle attività teoricamente in grado di ridurre al minimo il contributo delle fonti energetiche tradizionali per il riscaldamento degli ambienti, per il raffrescamento degli stessi e per la produzione di acqua calda sanitaria, massimizzando invece il ricorso alle fonti energetiche di tipo rinnovabile.

In linea generale, seguendo quanto proposto nella ASHRAE GreenGuide³³ si possono indicare le seguenti linee guida per la realizzazione di una catena energetica di tipo sostenibile:

- efficiente sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili, del suolo, dell'acqua e sfruttamento delle energie rinnovabili in sito in modo da ottenere un consumo netto di energia nullo o comunque la minimizzazione del consumo di risorse naturali;
- minimizzazione delle emissioni che impattano negativamente sugli ambienti confinati in cui viviamo e sull'atmosfera del pianeta (il particolato aerodisperso, le piogge acide e tutte le emissioni che influiscono sulla qualità dell'aria interna, sull'effetto serra e sul riscaldamento globale);
- minimizzazione dello scarico di rifiuti solidi e liquidi (scarti, rifiuti domestici, liquami e acque meteoriche) e contenimento delle infrastrutture necessarie per la loro rimozione;
- minimizzazione dell'impatto negativo sugli ecosistemi locali;
- massimizzazione della qualità degli ambienti confinati (in particolare qualità dell'aria e comfort termico).

Uno dei propositi del progetto è quindi quello di mostrare come un utilizzo appropriato delle fonti di energia rinnovabile disponibili e l'adozione di sistemi produttivi integrati, in grado di sfruttare in maniera ottimale tutti i flussi termici prodotti, possa soddisfare i punti sopra indicati consentendo di ottenere i desiderati risultati di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale.

³³ ASHRAE GreenGuide: The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings, Ed. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Press (2006)

Diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico si sono quindi focalizzate sullo studio di processi per il condizionamento degli edifici basati su tecnologie innovative che utilizzano l'energia solare (solar heating and cooling) o comunque fonti di energia alternative. Questo perché, come già evidenziato, le tecnologie tradizionalmente utilizzate per il condizionamento invernale ed estivo (sistemi a compressione con motori elettrici) sono causa di notevoli sovraccarichi della rete elettrica di distribuzione con conseguente rischio di black-out elettrici, nonostante negli ultimi anni i valori di COP (*Coefficient Of Performance*) ed EER (*Energy Efficiency Ratio*) delle pompe di calore invertibili siano di molto migliorati.

L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda di climatizzazione con la disponibilità di energia solare.

Lo sviluppo delle tecnologie di solar heating & cooling e il raggiungimento di elevati livelli di produttività ed affidabilità può peraltro consentire l'impiego di tali sistemi anche in ambito industriale, laddove sia richiesta una produzione di calore di processo a media temperatura.

Considerato che nel settore residenziale le tecnologie di solar heating & cooling abbinate anche ad interventi di retrofit energetico sugli edifici hanno già evidenziato la loro validità dal punto di vista energetico-ambientale, un settore nel quale risulta importante sperimentare l'efficacia di tali tecnologie innovative è quello dell'abbinamento dei sistemi solari a grossi impianti di refrigerazione ad assorbimento che già caratterizzano il settore terziario e commerciale per quanto riguarda la produzione di freddo per vari usi. Infatti, tali macchine che ricorrono al calore come fonte energetica di alimentazione, risultano particolarmente adatte ad essere impiegate nel caso in cui siano disponibili cascami di calore a basso costo (sistemi cogenerativi, calore di scarto da processi industriali) o fonti energetiche rinnovabili di tipo termico quali appunto le tecnologie solari a bassa e media temperatura.

L'evoluzione tecnologica ha permesso inoltre di sviluppare pompe di calore con efficienze doppie rispetto a quanto prodotto negli ultimi 10 anni, che si concretizzano in consumi di energia elettrica dimezzati. Oggi anche la pompa di calore è divenuta una tecnologia matura, che si evolve in soluzioni sempre più efficienti come l'utilizzo della tecnologia ad inverter. Lo sviluppo di pompe di calore in grado di garantire elevati COP in funzionamento invernale ed elevati EER in funzionamento estivo consente un abbattimento dei costi di esercizio anche del 50% rispetto ad impianti tradizionali.

L'utilizzo della pompa di calore permette di soddisfare responsabilmente il comfort richiesto negli ambienti serviti in termini di riscaldamento, raffreddamento e produzione di acqua calda sanitaria. La pompa di calore preleva direttamente dall'ambiente circa il 75% dell'energia necessaria al comfort utilizzando solo il 25% dalla rete elettrica. Il basso consumo di energia elettrica garantisce una riduzione delle emissioni di CO₂ fino al 60% rispetto ai sistemi tradizionali basati sull'uso di combustibili fossili.

Le pompe di calore utilizzano direttamente l'energia fornita dal sole e accumulata nell'aria, nell'acqua e nel suolo, senza nessuna emissione diretta in atmosfera e nessun utilizzo di combustibile fossile. Il calore fornito dal sole è infatti una fonte pulita ed inesauribile, rendendo la pompa di calore una fonte rinnovabile, riconosciuta come tale dalla direttiva europea RES "Renewable Energy Source".

Contestualmente alla climatizzazione elio-assistita, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura rappresentano un settore che può contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (CHP, Combined Heat Power) che consentirebbero un uso più efficiente dell'energia. In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata dai sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili ed in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare a micro-impianti a fluido organico (ORC) per la produzione congiunta di calore/freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione, si baserà sul livello di temperatura di progetto dell'impianto per cui potranno essere presi in considerazione sia concentratori basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC o su concentratori parabolici lineari o a lenti di Fresnel.

Il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, attuazione della direttiva europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, impone che nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- il 20% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- il 35% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- il 50% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Gli unici generatori in grado di rispettare i dettami del DLgs sono le pompe di calore elettriche a compressione, le pompe di calore alimentate a gas (sia a compressione che ad assorbimento), le caldaie a biomassa e gli impianti di solar heating and cooling.

Non esiste una sola tecnologia che sia sempre la migliore in qualsiasi situazione: la località di installazione, la destinazione d'uso, il tipo di edificio, la superficie da servire ed il numero di ore annue di accensione degli impianti determinano la scelta tra le diverse tecnologie presenti sul mercato.

Per valutare e rendere più efficienti le diverse tecnologie sono state realizzate presso i Centri Ricerche ENEA di Casaccia e di Trisaia alcune facility di prova dei vari componenti d'impianto (es. pannelli solari termici, scambiatori di calore, sistemi di dissipazione passiva, etc.) ed alcuni impianti pilota di tipo sperimentale a servizio di utenze reali o simulate.

Il prodotto di queste attività di ricerca è quindi lo sviluppo di un ventaglio di soluzioni valide e performanti che tengono conto delle zone climatiche dove le stesse amplificano i vari punti di eccellenza di ciascuna tecnologia. L'energia elettrica, abbinata e non all'energia resa disponibile dal sole, può quindi essere un'ottima alternativa ai combustibili fossili che in alcuni casi possono del tutto essere sostituiti dall'accoppiamento di questi due tipi di energia.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo principale del Progetto è quello di favorire una crescita nel ricorso alle tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente lo sviluppo di:

- componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- una varietà di soluzioni tecnologiche che consenta la scelta ottimale per ogni situazione climatica presente nel territorio nazionale.

L'analisi dei dati di reale funzionamento degli impianti installati negli edifici "dimostratori" realizzati consente, validando i modelli di ottimizzazione multiparametrica appositamente sviluppati, di poter conoscere il tempo di pay-back di questi impianti di climatizzazione innovativa. In parallelo tale analisi è fondamentale per permettere di valutare il comportamento reale dei vari componenti innovativi atti a realizzare il sistema integrato.

L'attività si sviluppa su due linee di attività fondamentali:

- la prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO₂, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche. A questo scopo si realizzano impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si assicura la partecipazione a network di ricerca internazionali (IEA);
- la seconda linea di attività riguarda l'integrazione del sistema di climatizzazione, cioè la costruzione di sistemi integrati che possano essere robusti e competitivi assolvendo l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale e della produzione di acqua calda sanitaria. In questo contesto si sviluppano: sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Le attività di ricerca sono articolate in tre macro obiettivi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

L'attività prevede la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento di prototipi di componenti innovativi costituenti il sistema integrato in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale.

a.1 Integrazione nell'impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell'edificio F92 di un accumulo termico a cambiamento di fase

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali, che ha curato l'analisi dei dati di funzionamento del nuovo accumulo termico del tipo a

cambiamento di fase (PCM).

ENEA si è occupata dell'acquisizione e quindi dell'elaborazione dei dati sperimentali di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling, realizzato a servizio dell'edificio F92, presente presso il C.R. ENEA di Casaccia. È stata quindi eseguita un'analisi del comportamento complessivo dell'impianto di riscaldamento e di climatizzazione comparando i dati di funzionamento relativi all'anno 2012 (serbatoio di accumulo termico tradizionale da 1.500 litri) ed all'anno 2013 (serbatoio di accumulo termico innovativo, PCM, da 1.000 litri).

L'impianto di solar heating and cooling è stato realizzato allo scopo di riscaldare durante il periodo invernale e di climatizzare durante il periodo estivo l'Edificio F-92. L'edificio si sviluppa su tre livelli (superficie totale pari a circa 380 m²) di cui ognuno servito da un circuito idraulico indipendente in modo tale da realizzarne l'esclusione, attraverso l'impianto di regolazione, quando le condizioni termometriche dello stesso sono soddisfatte. L'impianto può essere suddiviso in centrale di produzione, campo solare, termodotto di collegamento tra la centrale di produzione ed edificio, sottocentrale di edificio che smista ai vari circuiti il fluido termovettore, terminali d'impianto, rappresentati da pannelli radianti a pavimento e da fan coil a cassetta installati a soffitto.

Di seguito vengono presentati i risultati della campagna di acquisizione dati condotta nel periodo marzo-aprile 2013, per valutare le prestazioni del nuovo serbatoio di accumulo caldo installato a servizio dell'impianto. In Tabella 90 vengono sinteticamente presentate le energie termiche giornaliere rilevate:

- energia termica fornita all'accumulo dal campo collettori (FE02)
- energia termica fornita dall'accumulo PCM all'edificio F-92 (TANK_TO_LOAD)
- energia termica fornita dalla caldaia all'edificio F-92 (FE03)
- fabbisogno edificio F-92 (FE07).

Tabella 90. Energie termiche rilevate nel periodo 13 marzo - 15 aprile 2013

DATA	FE02 [kWh]	TANK TO LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
13/03/2013	7	0	132	130
14/03/2013	98	93	107	200
15/03/2013	123	110	80	190
16/03/2013	176	149	51	200
17/03/2013	21	31	119	150
18/03/2013	5	0	131	130
19/03/2013	157	133	67	200
20/03/2013	17	30	100	130
21/03/2013	178	147	43	190
22/03/2013	156	119	31	150
23/03/2013	110	110	30	140
24/03/2013	93	91	39	130
25/03/2013	29	28	82	110
26/03/2013	38	39	111	150
27/03/2013	134	91	35	126
28/03/2013	0	15	78	93
29/03/2013	45	28	104	132
30/03/2013	11	2	96	98
31/03/2013	113	87	57	144
TOTALE 13-31 marzo	1512	1303	1493	2793

DATA	FE02 [kWh]	TANK TO LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
01/04/2013	85	70	48	118
02/04/2013	37	35	80	115
03/04/2013	100	53	51	104
04/04/2013	57	75	47	122
05/04/2013	34	30	91	121
06/04/2013	127	78	41	119
07/04/2013	128	89	10	99
08/04/2013	108	81	18	99
09/04/2013	122	86	10	96
10/04/2013	116	91	9	100
11/04/2013	94	79	26	105
12/04/2013	103	84	24	108
13/04/2013	125	76	24	100
14/04/2013	80	71	9	80
15/04/2013	78	55	15	70
Totale 1-15 aprile	1394	1053	503	1556

	FE02 [kWh]	TANK TO LOAD [kWh]	FE03 [kWh]	FE07 [kWh]
TOTALE PERIODO	2906	2355	1997	4349

I dati sopra riportati:

- sono stati ottenuti da dati orari rilevati da misuratori di flusso CONTATERMIE tranne che per l'energia fornita dall'accumulo PCM, TANK_TO_LOAD, che risulta calcolata come differenza tra FE07 e FE03;
- sono stati utilizzati per confrontare il diverso comportamento dell'accumulo con PCM rispetto alla soluzione con accumulo standard.

In Tabella 91 sono riportate le caratteristiche fisiche e termodinamiche utilizzate nelle valutazioni che seguono relative all'accumulo: i 120 tubi sono stati posati all'interno dell'accumulo da 1000 L nominali nella parte inferiore come evidenziato in Figura 407. In figura si nota:

- disco di 840 mm di diametro e 15 mm di spessore per l'appoggio dei tubi posto ad un'altezza di 315 mm dal pavimento;
- 2 piastre forate (121 fori) per la tenuta in posizione dei 120 tubi PCM (1 foro centrale risulta non utilizzato).

Tabella 91. Accumulo PCM: caratteristiche fisiche tubi utilizzati tipo S46

DESCRIZIONE	2013
Numero di tubi PCM	120
Lunghezza tubo PCM, mm	1000
Diametro tubo PCM, mm	50
Massa tubo PCM, kg/tubo	2.8
Volume totale tubi PCM, L	236
Calore specifico PCM, kJ/(kg °C)	2,41
Calore latente per tubo, kJ/tubo	532,8

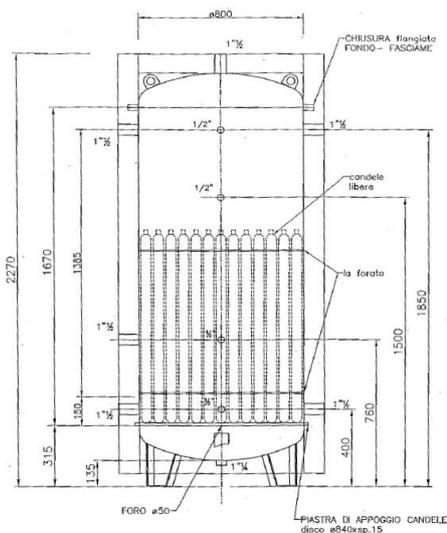


Figura 407. Accumulo PCM, vista in sezione

La capacità teorica dell'accumulo valutata considerando sia il calore sensibile che quello latente è presentata in Tabella 92; nel caso specifico l'accumulo standard 2012 ha solo la componente sensibile³⁴, mentre l'accumulo con PCM ha sia la componente sensibile (considerando sia l'acqua che il PCM) che quella latente dei PCM.

Dal confronto emerge che l'accumulo con PCM ha una capacità teorica di 300 MJ (83,3 kWh) che risulta quindi inferiore del 25% rispetto a quella dell'accumulo tradizionale di 408 MJ (113,3 kWh). La componente sensibile del solo volume d'acqua rappresenta il 61%: la restante parte è ripartita tra latente (21%, 17,8 kWh) e sensibile (18%, 14,7 kWh) (Tabella 92 e Figura 408).

Tabella 92. Accumulo standard vs accumulo PCM. Capacità termica teorica

	CAPACITÀ TERMICA LATENTE SERBATOIO	CAPACITÀ TERMICA SENSIBILE SERBATOIO	CAPACITÀ TERMICA TOTALE
SERBATOIO STANDARD	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]
	0	272	272
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
	0	408	408
SERBATOIO ACQUA	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]
	0	201	201
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
	0	183	183
SERBATOIO PCM*	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]	[MJ/m ³]
	71	58	129
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
	64	53	117

*Volume considerato pari alla somma del volume d'acqua e del volume dei tubi PCM

³⁴ L'energia sensibile viene calcolata considerando la temperatura minima di 30 °C e la temperatura massima dell'accumulo di 95 °C prevista dalla logica dell'impianto

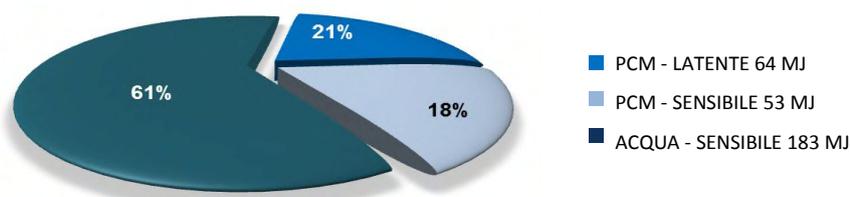


Figura 408. Accumulo PCM. Dettaglio capacità teorica di accumulo

Confronto 2012-2013

Di seguito viene presentata l'analisi dei dati sperimentali ottenuti sull'impianto nel periodo 13 marzo - 15 aprile 2012 e 2013. Tale analisi viene qui solo brevemente commentata; maggiori dettagli sono disponibili nel rapporto RdS/2013/088.

In Tabella 92 e 93 vengono riassunti alcuni parametri di confronto.

Tabella 93. Accumulo standard vs accumulo PCM. Caratteristiche fisiche

DESCRIZIONE	2012	2013
VOLUME NOMINALE, L	1500	1000
VOLUME INTERNO UTILE TOTALE, L	1500	906
VOLUME TOTALE PCM, L	-	236
VOLUME INTERNO ACQUA, L	1500	671
VOLUME ACQUA A CONTATTO TRA PCM, L	0	254
VOLUME ACQUA SOPRA PCM, L	0	416
ALTEZZA UTILE, L	-	1850
DIAMETRO INTERNO, L	-	790

Tabella 94. Accumulo standard vs accumulo PCM

	MARZO 2012	MARZO 2013		APRILE 2012	APRILE 2013
TEMPERATURA MEDIA PERIODO, °C	14,3	11,0	TEMPERATURA MEDIA PERIODO, °C	13.3	14.3
VOLUME ACCUMULO, L	1500	906	VOLUME ACCUMULO, L	1500	906
TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO, °C	20,0	22,0	TEMPERATURA INTERNA EDIFICIO, °C	20.2	22.0
FE07/GG, kWh/GG	12.0	13.4	FE07/GG, kWh/GG	12.6	11.9
TANK_TO_LOAD/GG, kWh/GG	9,9	6.2	TANK_TO_LOAD/GG, kWh/GG	8.7	8.0
FE07, kWh	1290	2793	FE07, kWh	1070	1556
FE03, kWh	229	1493	FE03, kWh	331	503
FE02, kWh	1677	1512	FE02, kWh	1159	1394
TANK_TO_LOAD, kWh	1061	1303	TANK_TO_LOAD, kWh	739	1053
SOLAR FRACTION, %	82	47	SOLAR FRACTION, %	69	68

- Temperatura media periodo: i giorni del mese di marzo 2012 sono stati nettamente più caldi dell'equivalente periodo del 2013 con una differenza in media di 3,3 °C. Viceversa i giorni del mese di aprile risultano più confrontabili avendo temperature medie che si discostano di 1 °C;
- Volume accumulo caldo: per il 2012 è stato utilizzato un accumulo standard ad acqua da 1500 L; per il 2013 è stato costruito un accumulo predisposto per contenere 120 tubi PCM da 1 m di lunghezza per 50 mm di diametro. Il volume occupato dai tubi PCM è stimato in 236 L riducendo a 671 L il volume reale di acqua dell'accumulo (di cui 254 L tra il fasciame dei tubi PCM e separati dal volume superiore d'acqua da una piastra per la tenuta in sede dell'accumulo).
- Temperatura edificio e correzione con gradi giorno: la temperatura di set-point dell'edificio è stata

aumentata da 20 °C del 2012 a 22 °C del 2013. Tale differenza di temperatura comporta un carico termico richiesto dall'edificio tendenzialmente superiore per il 2013 rispetto all'anno precedente: al fine di garantire la bontà del confronto tra periodi di anni diversi abbiamo corretto il fabbisogno dell'edificio (FE07) e il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio (TANK_TO_LOAD) dividendoli per i gradi giorno del relativo periodo³⁵. Dalla tabella i giorni di aprile 2012-2013 risultano avere un indice FE07/GG più simile, rispettivamente di 12,6 e 11,9 kWh/GG, rispetto ai giorni di marzo; il periodo di aprile risulta quindi maggiormente adatto al confronto. Se consideriamo l'indice relativo al contributo dell'accumulo al riscaldamento dell'edificio (TANK_TO_LOAD/GG) otteniamo un valore per il 2013 pari a 8 kWh/GG, in linea con gli 8,7 kWh/GG del 2012.

- Solar Fraction: il contributo dell'accumulo al fabbisogno dell'edificio nei primi 15 giorni di aprile (periodo preferibile per il confronto) è risultato pressoché simile con una percentuale di 69% per il 2012 e di 68% per il 2013. La percentuale di utilizzo dell'energia solare data dall'accumulo (TANK_TO_LOAD/FE02) risulta pari a 76% nel caso di accumulo con PCM (2013) contro il 64 % dell'accumulo std (2012); tale dato, come già visto, è in parte condizionato da una temperatura di set-point 2013 dell'edificio superiore di 2 °C rispetto al valore utilizzato nel 2012 contro un aumento della temperatura media dell'aria esterna di circa 1 °C dal 2012 al 2013.

Per l'osservazione dettagliata del funzionamento dell'accumulo nell'arco delle 24 ore si è partiti dalla configurazione 2012 analizzata utilizzando un grafico del tipo in Figura 409. La figura rappresenta l'andamento dei profili di temperatura sul lato alto (TE07 - curva arancione) e sul lato basso (TE08 - curva azzurra) dell'accumulo in funzione dell'energia termica immessa (area rossa) e prelevata (area blu); la linea tratteggiata nera rappresenta il bilancio orario tra energia immessa e prelevata dall'accumulo.

Le grandezze rappresentate nei grafici che seguono sono le seguenti:

- TE07 – temperatura parte alta accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- TE08 – temperatura parte bassa accumulo (valore medio nei 10 minuti)
- FE02 – apporto energia termica collettori solari all'accumulo (valore medio orario)
- TANK_TO_LOAD – contributo accumulo solare al fabbisogno edificio.

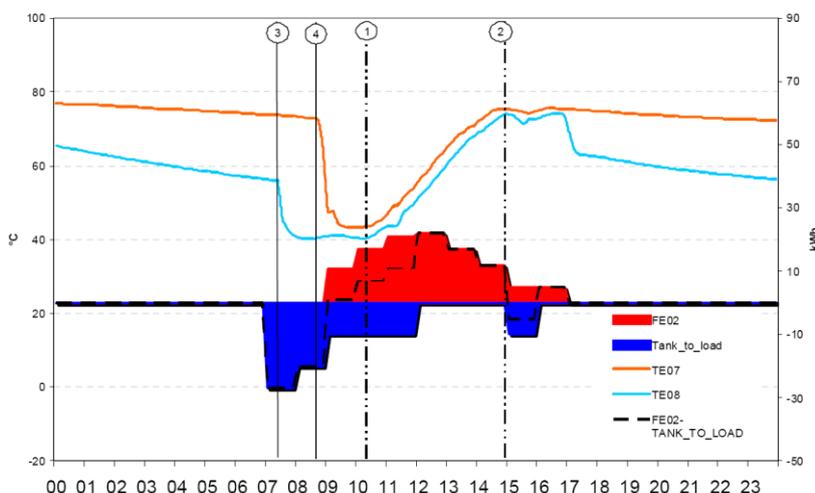


Figura 409. Accumulo STD - 2 aprile 2012. Carica dell'accumulo (1-2)

Nell'esempio considerato abbiamo:

- Tra le 7:20 e le 8:40 (intervallo 3-4) la temperatura sulla parte alta dell'accumulo rimane invariata intorno ai 73 °C a fronte di una richiesta di calore da parte dell'edificio. Nella parte inferiore dell'accumulo invece la temperatura si abbassa da 55,9 a 40,5 °C (intervallo 3-4) come conseguenza del prelievo di calore per 27 kWh. Se consideriamo che tutto il volume d'acqua sia ad una temperatura media di circa 65-70 °C otteniamo che circa 2/3 dell'energia sensibile dell'accumulo viene utilizzata.
- Tra le 8:40 e le 10:20 (intervallo 4-1) la temperatura superiore dell'accumulo si porta a 43,4 °C (quella inferiore rimane pressoché costante) a fronte di un prelievo netto di 19 kWh (vedi linea tratteggiata); tale

³⁵ Gradi Giorno (GG) calcolati come sommatoria nel periodo considerato (13-31 marzo, 1-15 aprile) della differenze positive tra temperatura interna di set-point e temperatura media giornaliera nelle 24 ore

valore è coerente con l'energia residua dell'accumulo (1/3 su 45 kWh).

- Tra le 10:20 e le 15:00 la temperatura superiore passa da 43,6 a 75,3 °C e quella inferiore da 40,5 a 74,0 °C con profili con pendenza abbastanza costante.
- Dopo le 15:00 un flusso netto in uscita di calore di 5 kWh porta la temperatura a ridursi di circa 3 °C; si osserva poi, dopo una prima riduzione netta della TE08 per effetto della stratificazione e della presenza delle connessioni in/out, che i profili di temperatura TE08 e TE07 decrescono con la stessa leggera pendenza rispettivamente da 75,3 a 69,4 °C e da 63 a 50,3 °C fino alle ore 7:00 del giorno successivo (nel grafico la curva viene troncata alle ore 24:00).

Estrapolando i dati ottenuti durante la campagna di misura del 2012 è stato possibile costruire la Tabella 6 in sono stati messi a confronto 4 giorni nell'intervallo temporale dal 13 marzo al 15 aprile come segue:

- *Funzionamento giornaliero*: è riportata l'energia fornita dal solare all'accumulo (FE02) e quella che l'accumulo ha fornito all'edificio (TANK_TO_LOAD) nell'arco delle 24 ore; per differenza viene calcolato il contributo netto all'accumulo.
- *Fase di carica dell'accumulo*: nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (Figura 409, intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza. E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica³⁶ utilizzando la temperatura media all'inizio del processo e alla fine (TANK - Totale calcolato).
- Il dato confrontato con il valore misurato dal misuratore Contatermie (TANK -Totale misurato) risulta avere uno scostamento percentuale sul valore misurato sempre in difetto (calore calcolato con profili di temperatura inferiore a quello desunto dalle misure con contatori) compreso tra l'11 e il 18%. Tale minor calore può attribuirsi in parte all'effetto delle dispersioni termiche sulla linea tra scambiatore solare SC01 ed accumulo ed in parte alle dispersioni termiche lungo la linea tra accumulo e termodotto³⁷.

Tabella 95. Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione invernale dell'edificio (anno 2012): confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con contatermie

			15/03/2012	29/03/2012	02/04/2012	12/04/2012	
FUNZIONAMENTO GIORNALIERO	FE02	[kWh]	149.1	140.2	110	133	
		[MJ]	536.8	504.7	396	478.8	
	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-93.0	-63.0	-87	-89	
		[MJ]	-334.8	-226.8	-313.2	-320.4	
	TANK	[kWh]	56.1	77.2	23	44	
		[MJ]	202.0	277.9	82.8	158.4	
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2012	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.30	10.20	9.00
		TE07	[°C]	41.3	48.5	43.6	35.7
		TE08	[°C]	36.4	43.0	40.5	33.2
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	38.9	45.8	42.05	34.45
	FINE	TIME	[h]	16.00	17.00	15.00	17.10
		TE07	[°C]	81.8	93.9	75.3	70.1
		TE08	[°C]	79.8	92.6	74.0	68.1
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	80.8	93.3	74.7	69.1
	ENERGIE	A - TANK - TOTALE CALCOLATO	[kWh]	73.2	82.9	56.9	60.4
			[MJ]	263.5	298.3	204.7	217.6
		FE02	[kWh]	118.1	111.1	89.0	131.0
			[MJ]	425.2	400.0	320.4	471.6
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-10.0	-20.0	-63.0
			[MJ]	-108.0	-36.0	-72.0	-226.8
B - TANK - TOTALE MISURATO		[kWh]	88.1	101.1	69.0	68.0	
		[MJ]	317.2	364.0	248.4	244.8	
TANK - TOTALE [A-B]		[kWh]	-14.9	-18.2	-12.1	-7.6	
		[%]	-16.9%	-18.0%	-17.6%	-11.1%	

³⁶ Vengono trascurate le perdite di calore per dissipazione attraverso il contenitore

³⁷ Il calore fornito dall'accumulo, TANK_TO_LOAD, viene stimato come differenza tra fabbisogno dell'edificio, misurato all'inizio del termodotto dalla sonda FE07, e calore fornito dalla caldaia FE03; quindi il calore calcolato come differenza ingloba anche le dispersioni di calore lungo la linea tra sonda FE03 (locale caldaia) e scambiatore SC02

La stessa metodologia seguita per il 2012 è stata applicata (Tabella 96) per l'anno 2013 considerando 6 giorni selezionati nell'intervallo dal 13 marzo al 15 aprile per l'impianto con accumulo PCM. Come già fatto in precedenza, nell'arco della giornata è stato isolato l'intervallo (Figura 410, intervallo 1-2) in cui l'accumulo si carica per effetto dell'apporto solare con o senza contemporaneo prelievo di calore verso l'utenza.

Tabella 96. Fase di carica dell'accumulo durante la climatizzazione invernale dell'edificio (anno 2013). Confronto tra energia accumulata calcolata sulla base dei dati di temperatura e misurata con contatermie

			16/03/2013	21/03/2013	22/03/2013	13/04/2013	14/04/2013	15/04/2013	
FUNZIONAMENT O GIORNALIERO	FE02	[kWh]	176.0	178.1	156	125.0	80	78.1	
		[MJ]	633.6	641.16	561.6	450.0	288	281.16	
	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-156.0	-155	-125.7	-76.0	-71	-55	
		[MJ]	-561.6	-558	-452.52	-273.6	-255.6	-198	
TANK - TOTALE	[kWh]	20.0	23.1	30.3	49.0	9	23.1		
	[MJ]	72.0	83.16	109.08	176.4	32.4	83.16		
FASE DI CARICA DELL'ACCUMULO 2013	INIZIO	TIME	[h]	10.00	10.00	10.00	8.00	9.00	8.20
		TE07	[°C]	39.0	39.8	40.9	36.8	44.8	38
		TE08	[°C]	31.5	32.7	34.4	31.7	39.5	35.7
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	36.2	37.1	38.4	34.9	42.8	37.1
	FINE	TIME	[h]	15.30	15.30	16.30	18.00	13.20	15.30
		TE07	[°C]	64.8	66.2	77.7	92.2	92.6	93.0
		TE08	[°C]	58.7	59.9	70.8	85.4	86.0	86.5
		TE-07/08 MEDIA	[°C]	62.5	63.8	75.1	89.6	90.1	90.5
	A - TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	20.5	20.8	28.6	42.7	36.9	41.7	
		[MJ]	74.0	75.0	102.9	153.8	132.9	150.0	
	ENERGIE	FE02	[kWh]	133.0	131.1	119.0	125.0	68.0	72.1
			[MJ]	478.8	472.0	428.4	450.0	244.8	259.6
		TANK_TO_LOAD	[kWh]	-96.0	-100	-80.0	-63.0	-20.0	-20.0
			[MJ]	-345.6	-360	-288.0	-226.8	-72.0	-72.0
	B - TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	37.0	31.1	39.0	62.0	48.0	52.1	
		[MJ]	133.2	112.0	140.4	223.2	172.8	187.6	
B' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	31.1	26.2	32.8	52.1	40.4	43.8		
	[MJ]	112.0	94.1	118.1	187.7	145.3	157.7		
PCM [B-A]	[kWh]	16.5	10.3	10.4	19.3	11.1	10.4		
	[MJ]	59.2	37.0	37.5	69.4	39.9	37.5		
PCM CORRETTO [B'-A]	[kWh]	10.6	5.3	4.2	9.4	3.5	2.1		
	[MJ]	38.0	19.1	15.1	33.9	12.4	7.7		
PCM CORRETTO / TANK - TOT.MISURATO CORRETTO [(B'-A)/B']		[%]	34%	20%	13%	18%	9%	5%	

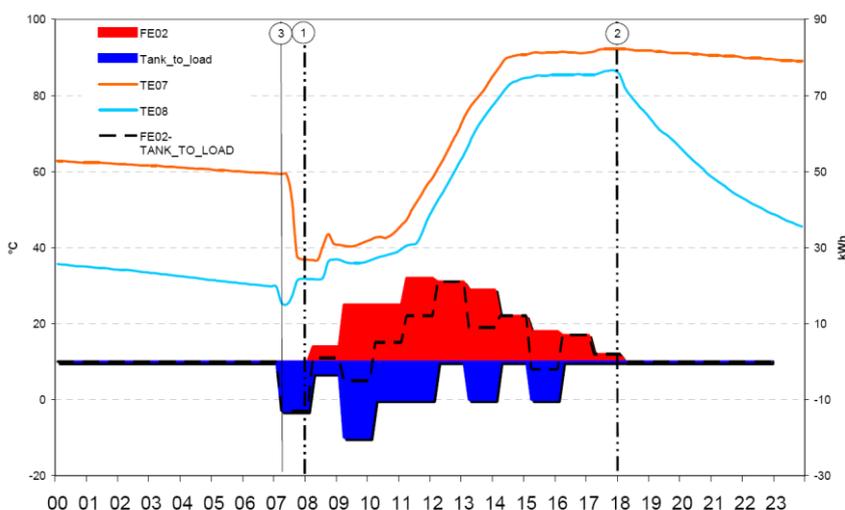


Figura 410. Accumulo PCM - 13 aprile 2013. Carica dell'accumulo (1-2)

E' stato quindi calcolato il calore netto fornito all'accumulo mediante 1° principio della termodinamica utilizzando la temperatura media all'inizio e alla fine del processo (TANK-Sensibile). Il dato confrontato con il valore estrapolato (TANK-Totale) come somma algebrica tra l'energia FE02 e TANK_TO_LOAD risulta in questo caso avere uno scostamento non trascurabile e sempre positivo variabile da 10,4 a 19,3 kWh.

Tale scostamento è indicato alla voce PCM [B-A] ed è attribuibile al contributo latente/sensibile dei PCM. Tuttavia, il contributo così stimato va corretto per lo scostamento percentuale medio rilevato nelle misure dell'accumulo standard nel 2012 (Tabella 95). Il risultato è evidenziato alla voce PCM [B'-A] il contributo varia ora tra 2,1 e 10,6 kWh: sulla totale energia accumulata, la quota relativa ai PCM varia, per tutti i giorni considerati, tra 5 e 34% in funzione del calore accumulato e dello stato dei tubi di calore all'inizio del processo di carica.

Processo di carica e scarica del serbatoio PCM

I risultati relativi al processo di carica diurna e scarica serale dell'accumulo PCM, effettuati a partire dal 16 aprile e fino al 5 maggio 2013, vengono illustrati in Figura 411:

- L'accumulo alle ore 8:20 si trova ad una temperatura nella parte più calda inferiore a 40 °C. Siamo quindi al di sotto della temperatura di fusione caratteristica del PCM pari a 46 °C. Il PCM è in fase solida.
- Nella prima fase di carica diurna (1-2) l'accumulo riceve dalle ore 8:20 alle ore 13:00 energia pari a 60 kWh rappresentata dall'area rossa nella parte inferiore del grafico; tale energia porta la temperatura interna media dell'accumulo da 36,4 a 90,4 °C. La pendenza simile tra i due profili di temperatura non mette in evidenza la presenza del PCM nella parte bassa dell'accumulo. Tuttavia, il calore sensibile fornito al volume interno effettivo d'acqua di 671 L è pari a 42,1 kWh. La differenza di energia tra 42,1 e 60 kWh (17,9 kWh) è imputabile all'effetto di carica dei PCM.

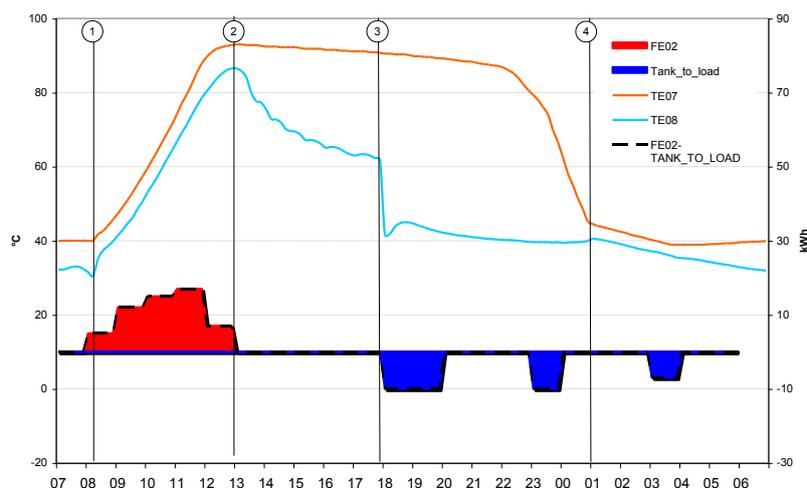


Figura 411. Accumulo PCM - 19 aprile 2013: carica dell'accumulo (1-2); 1 scarica accumulato (2-3); 2 scarica accumulato (3-4)

- Nelle successive 5 ore (2-3) non vi sono flussi di calore in ingresso o uscita dall'accumulo e la temperatura della parte alta rimane pressoché inalterata fino alle ore 18:00 abbassandosi leggermente a 90,7 °C.
- Nello stesso intervallo di tempo la temperatura della parte inferiore dell'accumulo varia invece vistosamente portandosi alle ore 18:00 al valore di 61,9 °C (1a Fase di scarica dell'accumulo); questo effetto può essere principalmente ricondotto all'assorbimento di calore latente/sensibile (surriscaldamento di parte del PCM fuso) dei tubi PCM. Il profilo non è ben definito e si notano dei punti in cui la temperatura tende a rimanere costante per poi ridiscendere: possiamo quindi ipotizzare che vi sia l'effetto di fusione del PCM nella parte inferiore del tubo unito alla successiva migrazione del materiale fuso verso la parte superiore. Tale processo induce uno scambio discontinuo e quindi un profilo irregolare.
- Inoltre, se andiamo a considerare il volume di acqua presente tra il fasciame di tubi (separato tra l'altro dalla parte superiore dell'accumulo da una piastra per la tenuta in posizione dei tubi) troviamo che esso è pari a 254 L. Ipotizzando che l'energia scambiata tra acqua e tubi sia relativa alla metà inferiore dei tubi (127 L) otteniamo un'energia assorbita pari a circa 14,3 MJ (pari a 4 kWh, che sommati ai precedenti 17,9 kWh sono l'energia necessaria ai PCM per passare da 40 °C a completa fusione).

- Tra le 18:00 e le 20:00 (3-4) vengono prelevati dall'accumulo 20 kWh di energia termica (vedi area blu) che si traducono in un abbassamento brusco della temperatura inferiore dell'accumulo da 61,9 a 41,8 °C. Nello stesso arco di tempo, però, si nota anche un aumento momentaneo della temperatura (45,0 °C) probabilmente dovuto al rimescolamento tra acqua immessa e acqua dell'accumulo. Se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto intorno ai 45 °C possiamo stimare un prelievo d'acqua di circa 400 L pari al volume d'acqua sopra i PCM.
- Tra le 20:00 e le 22:30 l'accumulo rimane ben stratificato fino ad un ulteriore prelievo di energia di 10 kWh tra le 23:00 e le 24:00: se consideriamo la temperatura di ritorno dal termodotto verso l'accumulo di 45°C otteniamo un prelievo d'acqua dall'accumulo di circa 200 L; tale quantità d'acqua unita a quella prelevata prima delle 20:00 è pari a circa il 90% del volume d'acqua dell'accumulo; infatti, si assiste ad una progressiva riduzione di temperatura (2a Fase di scarica dell'accumulo), per effetto del rimescolamento interno, fino ad una temperatura di 45,3 °C prossima a quella della parte bassa dell'accumulo di 39,9 °C. Tale riduzione è marginalmente legata alla presenza nell'accumulo dei PCM (2,8 kWh).
- Nella Tabella 97 vengono presentati i dati della campagna di misura sull'impianto con accumulo PCM riassunti ed elaborati per 6 giorni, selezionati nell'intervallo dal 16 aprile al 5 maggio 2013 come già fatto per i dati dell'impianto in fase di climatizzazione invernale. Il totale calore corretto accumulato dai tubi PCM, calcolato come differenza tra energia netta accumulata misurata (TANK TOTALE MISURATO = FE02 + TANK_TO_LOAD) ed energia netta accumulata calcolata (come incremento di temperatura dell'accumulo tra l'inizio e la fine dell'intervallo considerato) risulta variabile tra 12,2 e 19,9 kWh. Se consideriamo solo la fase di carica dell'accumulo (intervallo 1-2) notiamo come il contributo corretto dei PCM è tutto sommato costante e compreso tra 20 e 24% del totale calore accumulato. Essendo il contributo latente pari al 21% della totale capacità termica è verosimile che in qualche caso i PCM riescano completamente a fondere portandosi a lavorare a temperatura superiore ai 46 °C nella parte inferiore.

Conclusioni

La campagna di misure sull'impianto di solar cooling and heating presso l'edificio F92 Casaccia si è sviluppata in tre fasi principali:

- misure con funzionamento in climatizzazione invernale (dal 13 marzo al 15 aprile 2013);
- misure con processo di carica/scarica controllato dell'impianto (dal 16 aprile al 5 maggio 2013);
- analisi comparativa performance impianto configurazione 2012 (serbatoio accumulo termico standard da 1500 litri) e configurazione 2013 (serbatoio di accumulo termico PCM da 1000 litri).

Per le prime due fasi dell'attività di ricerca, sono stati utilizzati anche i dati già rilevati durante l'impianto con accumulo standard nel periodo dal 13 marzo al 15 aprile 2012.

Dal confronto tra i dati del 2013 con quelli del 2012 emerge un comportamento simile tra i due tipi di accumuli per il periodo 1-15 aprile (periodo scelto per il confronto perché caratterizzato da condizioni meteorologiche/al contorno più simili). In particolare, i valori assunti dall'indice "energia fornita all'utenza per grado giorno" confermano il comportamento simile dei due accumuli (con accumulo PCM che presenta un ingombro inferiore di un terzo rispetto al serbatoio standard). Se osserviamo la massima energia accumulata, troviamo tuttavia 82,9 kWh per l'accumulo standard e 52,1 kWh per quello PCM: quindi proporzionale al volume dell'accumulo e alle capacità teoriche calcolate (vedi Tabella 94).

La seconda fase ha permesso di analizzare nel dettaglio il comportamento dei tubi PCM in fase di carica, già evidenziato durante la climatizzazione invernale dell'edificio: su un potenziale di accumulo di 32 kWh (di cui latenti 17,8 kWh) si riescono a raggiungere 17,9 kWh (14,4 kWh/8,3 kWh corretti) con la 1° fase di carica alla quale si aggiungono altri 6,8 kWh (5,5 kWh/2 kWh corretti) nelle successive fasi di scarica dell'accumulo (carica dei PCM). Risulta quindi in generale utilizzata una quantità di calore inferiore al calore latente di fusione/solidificazione dei PCM.

La terza fase dell'attività di ricerca ha messo in evidenza che l'impianto di solar heating e cooling ha sempre permesso durante il periodo di monitoraggio, sia invernale che estivo, il mantenimento delle condizioni di comfort termo igrometrico all'interno degli ambienti dell'edificio servito, dove le temperature interne sono state mantenute entro dei range stabiliti grazie alla logica di regolazione. Il mantenimento di tali temperature ambienti è stato ottenuto anche durante l'inverno 2013 e l'estate 2013 nonostante il grado di occupazione dell'edificio sia stato intenso. È stato riscontrato un risparmio, rispetto a sistemi di tipo tradizionale, in termini di consumi di energia primaria di natura fossile, quindi riduzione delle emissioni di CO₂, grazie allo sfruttamento della radiazione solare: durante il funzionamento invernale anno 2012 il sole ha coperto il 51% dei consumi per il riscaldamento degli ambienti, mentre nell'inverno 2013 la frazione solare è stata del 52%; nel funzionamento estivo anno 2012

c'è stata una copertura da fonte solare del 68% dell'energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento mentre nel 2013 il campo solare ha fornito il 60% dell'energia termica richiesta dal gruppo. Il monitoraggio invernale 2013 è stato caratterizzato da una minore quantità di energia termica dissipata dal dry cooler rispetto all'inverno 2012: il serbatoio di accumulo a cambiamento di fase da 1.000 litri ha permesso di immagazzinare maggiore energia termica rispetto all'accumulo di tipo standard avente capacità pari a 1500 litri. Si è inoltre riscontrato un maggiore fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'edificio essendo i set-point delle temperature ambiente più elevati rispetto all'inverno 2012: nonostante la richiesta superiore di energia, l'installazione dell'accumulo PCM ha comunque garantito l'ottenimento di una frazione solare pari al 52% (superiore a quella ottenuta nel 2012 di un punto percentuale). E' doveroso comunque evidenziare che il periodo di monitoraggio invernale anno 2013 è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna mediamente più alti, anche se la radiazione solare è risultata essere inferiore a quella misurata nell'anno 2012.

Tabella 97. Fase di carica e scarica diurna dell'accumulo: stima del contributo del PCM

			19/04/2013	24/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	03/05/2013	04/05/2013		
FASE DI CARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	8.20	9.00	8.00	8.30	8.00	8.00	
		TE07	[°C]	40	38.3	36.2	40.6	39.9	40.8	
		TE08	[°C]	30.5	25.8	24	32.1	29.7	31.8	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	36.4	33.6	31.6	37.4	36.0	37.4	
	FINE	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50	
		TE07	[°C]	92.8	93.0	93.0	93.0	93.0	93.0	
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.5	89.9	
	TOTALE	FE02	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1	
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4	
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	60.0	61.7	62.0	55.0	56.0	55.1	
			[MJ]	216.0	222.0	223.2	198.0	201.6	198.4	
		TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	42.1	44.1	45.8	41.3	41.8	41.0	
			[MJ]	151.7	158.9	164.9	148.6	150.3	147.5	
	0 - PCM	[kWh]	17.9	17.5	16.2	13.7	14.2	14.1		
		[MJ]	64.3	63.1	58.3	49.4	51.3	50.9		
1° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	ORA	[h]	13.00	13.20	13.30	13.00	12.50	12.50	
		TE07	[°C]	92.8	93	93	93	93	93	
		TE08	[°C]	86.5	85.4	85.8	85.8	83.9	84.8	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	90.4	90.1	90.3	90.3	89.5	89.9	
	FINE	ORA	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5	
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3	
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-4.0	-3.5	-3.3	-3.2	-3.5	-3.6		
		[MJ]	-14.3	-12.8	-12.1	-11.4	-12.7	-12.8		
	1 - PCM	[kWh]	4.0	3.5	3.3	3.2	3.5	3.6		
		[MJ]	14.3	12.8	12.1	11.4	12.7	12.8		
2° FASE DI SCARICA ACCUMULO	INIZIO	TIME	[h]	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	
		TE07	[°C]	90.7	90.9	91.1	90.9	90.5	90.5	
		TE08	[°C]	61.9	62.3	63.6	65.7	61.1	62.7	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	85.3	85.6	86.0	86.2	85.0	85.3	
	FINE	TIME	[h]	1.00	20.00	20.00	1.30	1.30	1.20	
		TE07	[°C]	45.3	42.4	39.8	43.8	45.3	44.2	
		TE08	[°C]	39.9	39.5	37.4	40.5	39.5	39.7	
		TE07/08 MEDIA	[°C]	43.3	41.3	38.9	42.5	43.1	42.5	
	TOTALE	TANK_TO_LOAD	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0	
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0	
		TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	-30.0	-40.0	-40.0	-30.0	-30.0	-30.0	
			[MJ]	-108.0	-144.0	-144.0	-108.0	-108.0	-108.0	
	TANK - SENSIBILE CALCOLATO	[kWh]	-32.8	-34.5	-36.7	-34.1	-32.7	-33.4		
		[MJ]	-118.2	-124.3	-132.3	-122.6	-117.8	-120.3		
			2 - PCM	[kWh]	2.8	-5.5	-3.3	4.1	2.7	3.4
				[MJ]	10.2	-19.7	-11.7	14.6	9.8	12.3
A - TANK - TOTALE MISURATO	[kWh]	30.0	21.7	22.0	25.0	26.0	25.1			
	[MJ]	108.0	78.0	79.2	90.0	93.6	90.4			
A' - TANK - TOTALE MISURATO CORRETTO	[kWh]	25.2	18.2	18.5	21.0	21.9	21.1			
	[MJ]	90.8	65.6	66.6	75.7	78.7	76.0			
B - TANK - TOTALE CALCOLATO	[kWh]	5.3	6.0	5.7	4.0	5.5	4.0			
	[MJ]	19.3	21.7	20.6	14.5	19.9	14.3			
PCM TOTALE [0+1+2] [A-B]	[kWh]	24.7	15.6	16.3	21.0	20.5	21.1			
	[MJ]	88.7	56.3	58.6	75.5	73.7	76.0			
PCM TOTALE CORRETTO[A'-B]	[kWh]	19.9	12.2	12.8	17.0	16.3	17.1			
	[MJ]	71.6	43.8	46.0	61.2	58.9	61.6			
0-PCM / TANK TOTALE MISURATO CORRETTO (FASE DI CARICA)		[%]	24%	22%	21%	20%	20%	21%		

Il monitoraggio estivo anno 2013 ha dimostrato che il serbatoio d'accumulo a cambiamento di fase, ed il relativo materiale PCM utilizzato nella sperimentazione (sali idrati), peggiora le prestazioni dell'impianto in funzionamento estivo. Nel funzionamento estivo la temperatura dell'accumulo è risultata sempre superiore alla temperatura di fusione del materiale PCM (46 °C) contenuto nell'accumulo, non rendendo possibile lo sfruttamento del calore latente di solidificazione. Poiché la capacità volumetrica dell'accumulo PCM (1000 litri) è inferiore rispetto a quella del serbatoio tradizionale (1500 litri) installato a servizio dell'impianto monitorato durante l'anno 2012, la capacità di accumulo di energia termica è risultata essere inferiore rispetto al monitoraggio estivo 2012. Nonostante il set-point delle temperature ambiente (set2013=24°C) è risultato essere inferiori rispetto a quello dell'estate 2012 (set2012=26°C), la richiesta di energia frigorifera da parte dell'edificio (FE07) è risultata essere inferiore poiché l'estate 2013 è stata caratterizzata da valori di temperatura dell'aria esterna inferiori rispetto all'estate 2012.

Durante l'estate 2013 l'edificio F-92 è stato infatti costantemente occupato quale sede di incontri tecnici e di formazione professionale: essendo previsto l'inizio delle lezioni in aula alle ore 8:30 del mattino, è stato necessario avviare l'impianto di climatizzazione alle ore 7:00. Questa scelta ha causato il ricorso ad un numero maggiore di ore (rispetto all'anno 2012) di utilizzo della caldaia integrativa a gas metano durante le prime ore del mattino, quando l'energia gratuita fornita dal sole non era sufficiente per produrre acqua alla temperatura di circa 85 °C (temperatura necessaria per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento azionato termicamente). Si è infatti riscontrato che l'edificio richiedeva nella prime ore più del 50% dell'energia frigorifera giornaliera (FE07 hourly): questo giustifica una frazione solare nell'estate 2013 inferiore rispetto a quella dell'estate 2012.

Le prestazioni del gruppo frigo ad assorbimento sono migliori nel 2013 in quanto il gruppo funziona per quasi tutto il periodo di marcia in prossimità delle condizioni nominali: l'affinamento della logica di regolazione ha permesso di garantire una temperatura dell'acqua di alimentazione sempre prossima agli 88 °C richiesti dal costruttore, sia in funzionamento con campo solare che con caldaia integrativa.

a.2 Campagna di prove sperimentali di un impianto di solar cooling a servizio di una serra per colture intensive

L'attività è stata incentrata sullo sviluppo di una facility per la caratterizzazione di sistemi solar cooling integrati in una serra sperimentale per la ricerca sulle piante transgeniche. Tale sistema è stato realizzato con un gruppo frigo ad assorbimento installato a servizio dell'edificio, denominato Serra Transgenica, esistente presso il C.R. Casaccia dell'ENEA.

La serra a contenimento è utilizzata per la sperimentazione di piante transgeniche per l'ottenimento di vaccini ed altre attività similari con sistemi vari di acquacoltura e illuminazione mista solare/artificiale. La serra a pianta rettangolare delle dimensioni di 18 metri di lunghezza per 12 di larghezza ha un'altezza di circa 4,5 metri ed ha l'asse longitudinale orientato secondo la direzione Nord-Sud. La superficie complessiva della serra è pari a circa 210 m², per un volume complessivo di circa 950 m³.



Figura 412. Impianto serra transgenica del C.R. ENEA Casaccia

L'impianto di Solar Cooling realizzato nella serra è stato installato implementando l'impianto di climatizzazione esistente costituito da due caldaie a gas naturale per il riscaldamento invernale, da un gruppo frigorifero a compressore elettrico da circa 100 kWf per il raffrescamento estivo e da una distribuzione interna del tipo a batterie alettate.

L'impianto di Solar Cooling realizzato è composto da:

1. campo solare realizzato con pannelli solari a tubi evacuati da 50 m²;
2. accumulo di energia termica costituito da un serbatoio di capacità pari a 1500 litri;

3. chiller ad assorbimento da 17,5 kWf alimentato completamente dall'energia termica prodotta dal campo solare e da una caldaia a gas metano a compensazione delle fluttuazione della radiazione solare disponibile;
4. torre evaporativa a servizio del chiller ad assorbimento;
5. installazione di un sistema di controllo ed acquisizione dei dati di funzionamento.

Dati di Monitoraggio

L'impianto di solar cooling è attualmente in funzione giorno e notte senza interruzione: il grafico delle temperature acquisite, relative agli ultimi 20 minuti di funzionamento dell'impianto, è sempre visibile on-line su un sito web interno ENEA realizzato allo scopo di condividere i dati con altre Unità Tecniche ENEA.

Il gruppo frigo ad assorbimento installato (Tipo YAZAKI modello WFC SC5) eroga la potenza frigorifera di circa 18 kW (Figura 413) alla temperatura di alimentazione dell'acqua calda di circa 88 °C, assorbendo 25 kW di potenza termica (Figura 414).

Si deve rilevare che l'impianto realizzato è stato progettato per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento con tutta l'energia termica che può essere prodotta dal campo solare installato, avente superficie pari a circa 50 m², prevedendo comunque l'eventuale integrazione di una caldaia a gas metano nel caso di mancanza e/o insufficienza della radiazione solare disponibile.

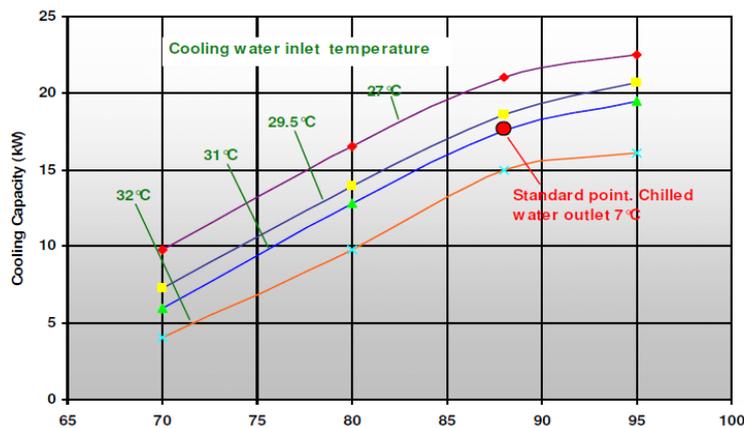


Figura 413. Potenza frigorifera erogata in funzione della temperatura dell'acqua calda di alimentazione

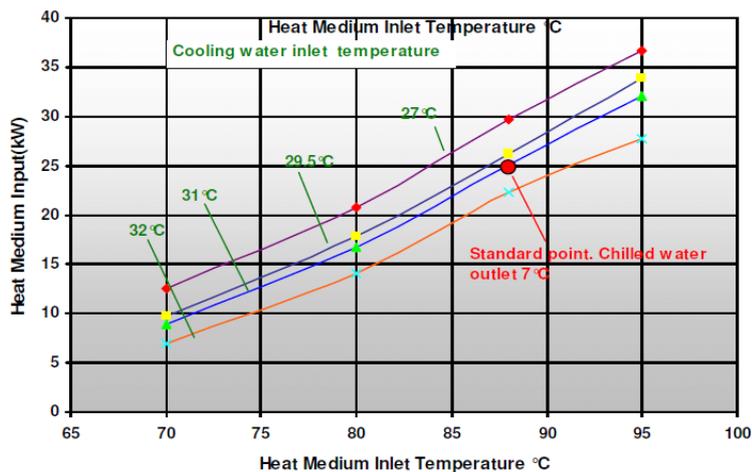


Figura 414. Potenza termica assorbita dalla macchina

Set point dei regolatori di temperatura

Il chiller Yazaki ad assorbimento è installato in parallelo alla macchina a compressione preesistente. Sul regolatore presente a bordo del chiller Yazaki, è stato impostato un set point di $7 \pm 0,5$ °C sulla mandata dell'acqua refrigerata; quello impostato sulla macchina a compressione è pari a 12 ± 1 °C, riferito alla temperatura di ritorno dell'acqua al gruppo. Considerando il salto termico tipico ($\Delta T=5$ °C) per queste apparecchiature, questa scelta permette un funzionamento continuo del chiller Yazaki ed uno intermittente di quello a compressione che è

funzione del carico termico da abbattere, senza che si rincorra in interferenze di funzionamento tra le due macchine. Pertanto, con questa configurazione si ottiene il massimo dell'utilizzo della fonte rinnovabile.

Il campo solare è regolato da una centralina COSMET 5 della KLOBEN, equipaggiata con una sonda Pt 1000 installata all'uscita dei pannelli solari ed una sonda con termistore 10K sulla parte inferiore del serbatoio di accumulo. La pompa del circuito idronico che alimenta i pannelli solari termici viene attivata in funzione della differenza di temperatura tra le due sonde (se superiore a 5 °C) e nel caso in cui la temperatura di mandata dei pannelli risulti inferiore a 95 °C (limite superiore di funzionamento del chiller Yazaki).

Se la temperatura dell'acqua calda prodotta dai pannelli solari termici supera i 100 °C, il flusso di acqua che attraversa il campo solare viene deviato verso l'aeroterma di smaltimento. La caldaia di integrazione, del tipo a fiamma modulante, ha un set point fissato a 90 °C con isteresi di spegnimento pari a 5 °C ed isteresi di riaccensione di 10 °C.

Analisi dati sperimentali

Nei grafici di Figura 415 vengono rappresentati alcuni parametri di funzionamento (temperatura esterna, temperatura in/out dal campo solare, temperatura in/out dalla macchina frigorifera, etc.) nelle giornate del 28 e 30 luglio 2013.

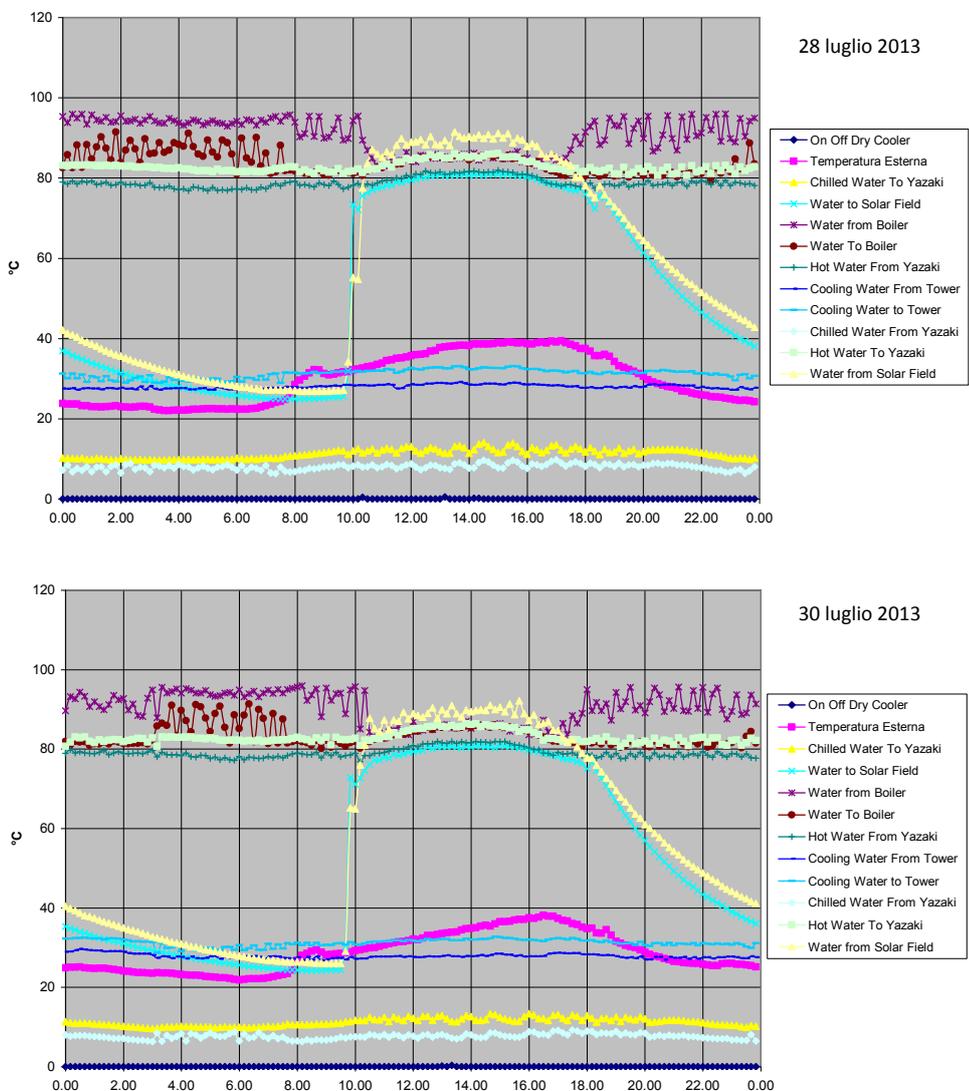


Figura 415. Dati rilevati il 28 e 30 luglio 2013

Con riferimento ai dati di sperimentali del 28 luglio 2013, il funzionamento dell'impianto di solar cooling può essere suddiviso in quattro grossi sottoinsiemi:

- Funzionamento solare: dalle 10.15 alle 18.00 (nel resto delle ore funziona la sola caldaia di integrazione);
- Funzionamento solo chiller Yazaki dalle 20.00 alle 10.00;
- Funzionamento solo chiller Yazaki parzializzato dalle 23.00 alle 8.00;
- Funzionamento chiller Yazaki + chiller a compressione dalle 10.00 alle 20.00.

Il funzionamento misto “chiller Yazaki + chiller a compressione” non vede mai il secondo acceso continuativamente, quindi il carico termico massimo anche in condizioni estive severe non supera i circa 120 kW frigoriferi messi a disposizione complessivamente da entrambi gli impianti.

L’analisi dei dati di funzionamento nell’intervallo di tempo di “Funzionamento Solare” mostra infatti un andamento ondulatorio delle temperature dell’acqua refrigerata in ingresso e di ritorno all’accumulo freddo del tipo a “dente di sega” (Figura 416), con un periodo di circa 30-40 minuti.

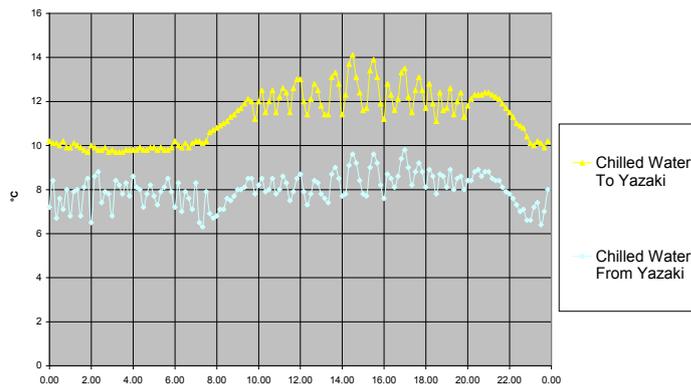


Figura 416. Temperatura IN/OUT chiller water

Tale andamento è spiegabile dall’intervento di tipo ON/OFF del chiller a compressione che ha una potenza massima di circa 100 kW_f. Il numero di interventi del chiller a compressione è di circa 16 nell’arco temporale preso in considerazione (funzionamento misto - circa 10 ore).

Dalle analisi effettuate è stato anche possibile stimare la potenza massima richiesta dalla serra nel periodo di massimo carico, dalle 12 alle 16. Infatti, la potenza della macchina frigorifera ad assorbimento nel periodo considerato (4 h) rimane più o meno costante sul valore medio di 14,14 kW mentre la macchina a compressione nel funzionamento ON/OFF eroga una potenza di 100 kW per circa il 54% del tempo complessivo.

Pertanto, l’energia frigorifera prodotta è pari a 56,6 kWh per la macchina ad assorbimento (14,14 kW·4 h) e 216 kWh per quella compressione (100 kW·2,16 h) per un fabbisogno energetico complessivo di circa 336 kWh corrispondente ad una potenza media di circa 68 kW nelle ore più calde di una giornata che ha registrato un caldo eccezionale per il clima di Roma.

Inoltre, in assenza di radiazione solare si è osservato il funzionamento della sola macchina ad assorbimento con una potenza media erogata di circa 11,1 kW (Figura 417) da cui si evince che la serra ha un carico termico diurno da smaltire, dovuto essenzialmente alla radiazione solare, al ricambio d’aria della serra ed alle lampade per le colture, in rapporto di circa 6:1 con quello notturno.

Nel funzionamento solare, la caldaia di integrazione è comunque saltuariamente accesa a potenza ridotta e il chiller Yazaki viene alimentato a circa 86 °C contro gli 83 °C del funzionamento con sola caldaia.

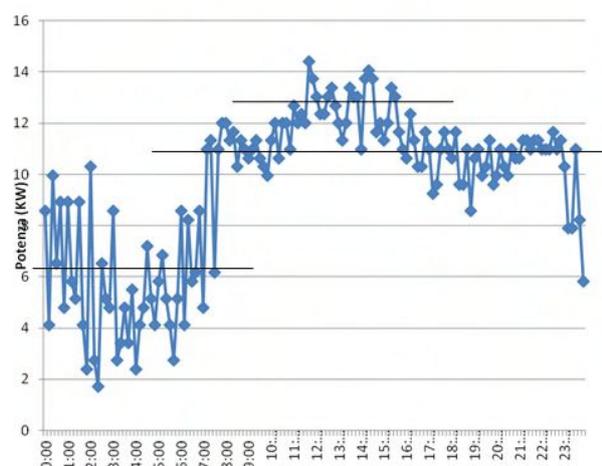


Figura 417. Potenze rilevate il 28 luglio 2013

Conclusioni

I dati fin qui rilevati per il funzionamento estivo hanno evidenziato il corretto funzionamento dei vari componenti dell’impianto ed hanno consentito di valutare il carico frigorifero necessario a mantenere le condizioni climatiche richieste per le sperimentazioni condotte nella serra.

Si può rilevare che nel caso fosse possibile realizzare una schermatura mobile esterna della copertura della serra durante i mesi estivi, utilizzando solo luce artificiale per l'illuminazione delle colture, il carico frigorifero potrebbe ridursi ad un valore molto prossimo a quello della potenzialità del solo impianto di solar cooling.

Infatti, nel caso che la schermatura sulla copertura orizzontale fosse in grado di ridurre la radiazione solare incidente sul piano orizzontale di circa l'80% (rete ombreggiante), considerando una radiazione solare massima di circa 850 W/m² nel periodo di funzionamento solare, come sopra definito, e considerato che il materiale con cui è costruita la copertura della serra (policarbonato alveolare) ha un fattore di trasmittanza di circa il 75%, allora la riduzione del carico frigorifero per i 112 m² circa di copertura effettivamente trasparente sulle zone coltivabili, sarebbe stimabile in circa 57 kW, cioè di poco inferiore al carico frigorifero di picco calcolato con i dati sperimentali raccolti. Questo dimostra che con la copertura aggiuntiva la macchina frigorifera ad assorbimento da 17 kW sarebbe sufficiente a garantire le condizioni climatiche richieste all'interno della serra con una riduzione quasi totale dell'energia elettrica attualmente impiegata.

a.3 Sviluppo di logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating and cooling e per impianti a pompa di calore a compressione

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, che ha curato l'analisi energetica comparativa delle differenti logiche di regolazione. ENEA si è occupata dello sviluppo, della programmazione e del test di logiche di regolazione avanzate progettate a servizio dell'impianto di solar heating and cooling che climatizza l'edificio F92, e dell'impianto a pompa di calore aria-aria realizzato a servizio dell'edificio F-76 (i due edifici sono entrambi presenti all'interno del C.R. ENEA di Casaccia).

L'attività è stata incentrata sullo sviluppo di logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating and cooling e per impianti a pompa di calore a compressione. Le prestazioni di questi impianti sono fortemente legate alle logiche di regolazione ed alla gestione intelligente delle fonti di energia rinnovabili che non sempre sono disponibili durante l'intero arco della giornata e quindi dell'anno. L'attività di ricerca svolta vede come obiettivo quello di sviluppare un elenco delle apparecchiature minime necessarie da installare in campo, oltre che gli schemi a blocchi semplificati della logica di regolazione da adottare nei vari tipi d'impianto.

Al fine di analizzare la correttezza della programmazione implementata all'interno dei PC industriali, cuore dei BMS (Building Management System), è stato realizzato un dimostratore in grado di simulare le reali condizioni di funzionamento degli impianti (Figura 418).

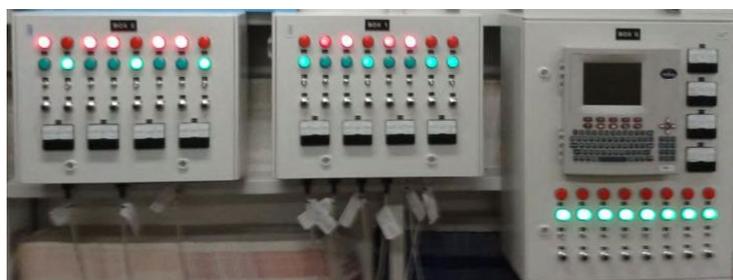


Figura 418. Dimostratore per collaudo logiche di regolazione avanzate

Per informazioni e dettagli sulle logiche sviluppate per le diverse tecnologie si rimanda al rapporto RdS/2013/090. Nel seguito si riporta una breve sintesi dei risultati delle analisi energetiche effettuate.

Impianti di solar heating and cooling

La convenienza di un impianto di solar heating and cooling è espressa attraverso il raggiungimento di obiettivi quali il risparmio energetico e monetario ottenuti rispetto all'utilizzo di una tecnologia tradizionale e attraverso il recupero dell'investimento inizialmente sostenuto per la realizzazione dell'impianto stesso in tempi ragionevoli (6-7 anni). È possibile raggiungere tali obiettivi non solo utilizzando componentistica altamente efficiente (primi fra tutti i collettori solari termici ed il gruppo frigo ad assorbimento) ma anche sviluppando un'opportuna logica di regolazione che sceglie i diversi profili di funzionamento dell'impianto in funzione delle numerose variabili in ingresso al BMS, acquisite in tempo reale, e legate anche alla variabilità delle condizioni termometriche esterne. La definizione di una logica di regolazione intelligente e definitiva parte da un'attenta analisi del comportamento dell'impianto in fase progettuale e viene perfezionata in seguito all'individuazione di scostamenti tra le prestazioni attese e quelle realmente fornite dall'impianto, evidenziati durante il monitoraggio dei primi risultati sperimentali.

Analisi energetica di differenti logiche di regolazione

Nel caso dell'impianto di solar heating and cooling dell'Edificio F92 sono state valutate le seguenti tre configurazioni di "downgrade impiantistico" rispetto alla soluzione già installata per la regolazione:

1. Impianto con regolazione centralizzata, in cui l'impianto modula la potenza rispetto ai segnali inviati al sistema di accumulo caldo da un unico termostato posto nell'Aula 1 al piano terra.
2. Impianto con regolazione di piano/zona. L'impianto modula la portata di acqua che alimenta i collettori di piano. Tre termostati sono rispettivamente collocati nell'Aula 1 al piano terra, nell'Aula 2 al piano primo, nella Hall impianti al piano seminterrato. Tali controlli termostatici regolano l'apertura/chiusura delle elettrovalvole montate in testa ai collettori.
3. Impianto con regolazione di piano/zona e correzione climatica. Configurazione simile alla regolazione 2. In questo caso, però, gli accumuli caldo e freddo variano la temperatura di set-point in funzione del livello termico esterno.

Nelle figure che seguono si riportano i valori di energia primaria richiesti per la climatizzazione invernale ed estiva (Figure 419 e 420), i costi di gestione nella stagione di riscaldamento (Figura 421), in quella di raffrescamento (Figura 422), e gli indicatori di controllo microclimatico (Figura 423).

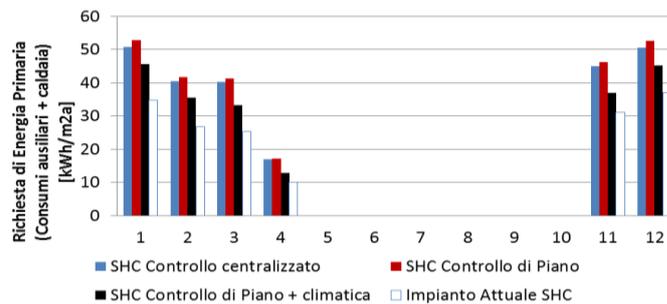


Figura 419. Energia primaria richiesta, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione invernale di una superficie unitaria dell'edificio

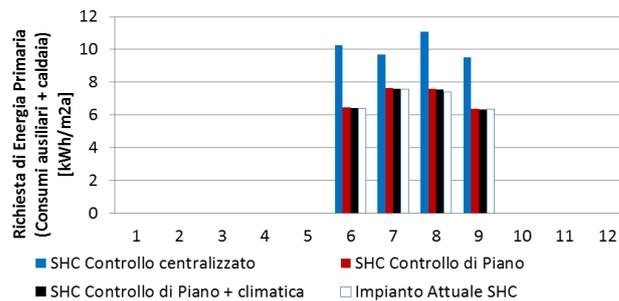


Figura 420. Energia primaria richiesta, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione estiva di una superficie unitaria dell'edificio

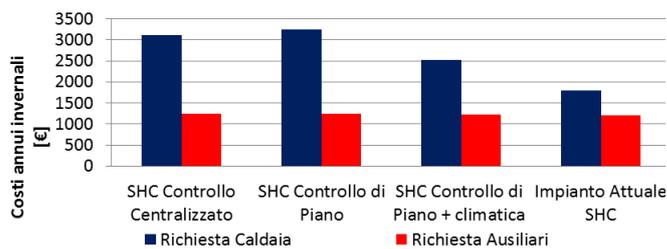


Figura 421. Costi economici, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione invernale dell'edificio

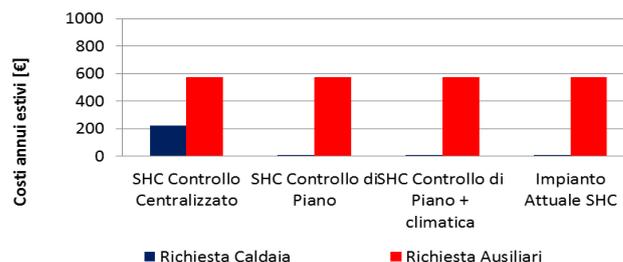


Figura 422. Costi economici, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione estiva dell'edificio

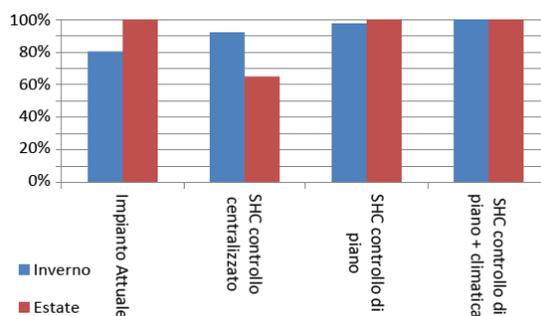


Figura 423. Indicatori di Prestazione di temperatura, relativi alle intere stagioni di riscaldamento e raffrescamento, al variare della tipologia impiantistica

Dall'analisi economica (Tabella 98), emerge l'assoluta convenienza di logiche di regolazione sofisticate, atte a governare con l'adeguata qualità ed in maniera dinamica, il complesso dei dispositivi impiantistici, dagli accumuli ai circolatori, con attenzione agli ambienti più rappresentativi.

Tabella 98. Valori del SPB (Simple PayBack), DPB (Discounted PayBack), VAN (Valore Attuale Netto) e IP (Indice di Profitto), per tutte le soluzioni alternative proposte

	SPB (anni)	DPB (anni)	VAN (€)	IP
SHC con controllo di piano	6,2	7,5	477	1,0
SHC con controllo di piano e correzione climatica	1,8	2,1	8564	6,0
SHC Regolazione attuale	5,9	7,2	10116	1,1

Di seguito, si propone un dettaglio dell'analisi di fattibilità tecnico-economica. Al netto dei costi di installazione del sistema di riferimento (€ 6700) che includono i dispositivi per la attivazione del "lato solare" dell'impianto (su cui non si interviene), risultano i seguenti costi extra, per regolazioni progressivamente più pregiate:

- Controllo di piano: extra-costi del sistema di regolazione stimato in € 470 (i.e., 7170 € - 6700 €). Il risparmio economico annuo stimato dai calcoli con TRNSYS sarebbe pari ad 76 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente.
- Controllo di piano più regolazione climatica: extra-costi del sistema di regolazione stimato in € 1'430.00 (i.e., 8130 € - 6700 €). Il risparmio economico annuo stimato dai calcoli con TRNSYS sarebbe pari ad 802 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente.
- Controllo attuale: extra-costi del sistema di regolazione stimato in € 9300 (i.e., 16000 € - 6700 €). Il risparmio economico annuo stimato dai calcoli con TRNSYS sarebbe pari a 1557 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente.

Più nel dettaglio, immediatamente, si nota come ciascun intervento di regolazione migliorata, dal più basilico con regolazione di piano piuttosto che centralizzata, fino a quello attuale con complesso meccanismo di controllo dei set-point e delle temperature medie ambiente, mostrino indici economici soddisfacenti.

In particolare, andando a valutare i costi di investimento, il valore attuale netto e il rientro economico attualizzato, l'attuale prevista regolazione mostra una piena fattibilità tecnico-economica. Attualizzando i flussi di cassa, infatti, è quella che presenta un VAN più alto rispetto a tutte le altre configurazioni, con un indice di profitto pienamente soddisfacente.

Impianti a pompa di calore aria - aria

Le pompe di calore aria-aria vengono utilizzate per la climatizzazione di grandi ambienti, principalmente del settore terziario.

Il fluido termovettore prodotto dalla pompa di calore (aria calda in inverno ed aria fredda in estate) viene immesso direttamente nell'ambiente da climatizzare: il mantenimento delle condizioni di comfort sarà quindi gestito variando la portata e la temperatura dell'aria immessa all'interno degli ambienti serviti. Al fine di garantire anche una corretta qualità dell'aria, sarà gestita anche una percentuale di aria esterna (aria di rinnovo) che è funzione della percentuale di CO₂ rilevata nell'aria di ripresa dai vari ambienti.

A servizio dell'impianto di test è stata quindi implementata una logica di regolazione atta ad assicurare il funzionamento ottimale del sistema al fine di garantire il comfort negli ambienti serviti, limitando i consumi energetici necessari. L'impianto che serve i vari ambienti, del tipo a tutt'aria, è a portata variabile. La gestione della temperatura dei vari ambienti viene effettuata variando la portata d'aria immessa tramite delle serrande di regolazione servocomandate (impianto a portata variabile a basso costo).

Il roof top è dotato di ventilatori a portata variabile comandati da inverter: sui rami di immissione dell'aria negli ambienti serviti sono state predisposte delle serrande motorizzate in grado di variare la portata immessa dal 40% al 100%.

Alla partenza dell'impianto, il roof-top elaborerà la massima portata d'aria (inverter a 60 Hz) senza l'immissione di aria esterna e lavorando a "tutto ricircolo", al fine di ridurre i tempi di messa a regime dell'edificio: questa modalità di "messa a regime" sarà comunque funzione della richiesta termica dei vari ambienti serviti. In seguito si valuterà la necessità di elaborare anche una certa frazione di aria esterna che dipenderà dal valore rilevato dalla sonda di CO₂ (<1000 p.p.m).

Il valore di temperatura presente in ciascun ambiente verrà confrontato con il valore di set della temperatura desiderata: si ha così un certo valore di portata immessa, funzione della percentuale di apertura della serranda.

Esempio

Se nel secondo ufficio dell'edificio in esame occorressero 1000 m³/h di aria, ovvero la massima portata, l'apertura della serranda sarebbe del 100%. Se invece, poiché la temperatura ambiente è prossima al valore di set point, avessimo bisogno di soli 300 m³/h, l'apertura sarebbe del 30% (si ipotizza un andamento lineare tra la percentuale di apertura e la portata d'aria che transita attraverso la serranda di regolazione). In funzione del valore della portata immessa nei diversi ambienti, dipendente dalla vicinanza tra la temperatura dei vari ambienti e quella di set point, avremo la massima portata erogata dal ventilatore. Quando il primo degli uffici arriverà in temperatura, verrà ridotta la portata d'aria immessa nello stesso mandando in chiusura il servomotore a servizio della serranda di taratura dedicata (apertura minima 40% della corsa, valore comunque settabile). Man mano che la temperatura all'interno degli altri uffici sarà prossima alla temperatura di set ($\pm 1^\circ\text{C}$), si procederà limitando la portata di aria immessa.

Si procederà con l'associare il proprio peso a ciascun segnale di posizionamento serrande in modo che la variazione percentuale da 40 a 100% del servo automatismo sia immediatamente convertita nella variazione di portata corrispondente: ogni segnale, inserito in un circuito sommatore, fornirà il valore della portata complessiva che dovrà essere elaborato dai ventilatori del roof top. A serrande completamente aperte la portata complessiva sarà pari a 5400 m³/h mentre con serrande al 40% sarà di 1500 m³/h. Il valore di portata così ottenuto rappresenta il set point di portata richiesto alla macchina.

In Tabella 99 si riportano le portate d'aria di progetto da immettere in ogni singolo ambiente, necessaria per valutare la legge che in funzione del numero di serrande in chiusura va a regolare la portata d'aria complessiva elaborata dal roof top.

Tabella 99. Portate d'aria nominali da immettere nei vari ambienti

Descrizione	Superficie [m ²]	Portata aria [m ³ /h]
Fotocopie/Fax: codice 001	18,3	400
Sala riunioni: codice 002	25,2	1000
Archivio: codice 003	20,0	500
Ufficio: codice 004	23,3	700
Ufficio: codice 005	19,5	450
Ufficio: codice 006	19,3	450
Ufficio: codice 007	22,7	650
Ufficio: codice 008	22,9	650
Ufficio: codice 009	22,2	600
Ufficio: codice 010	22,3	600
TOTALE	215,7	6000

Misurando la velocità dell'aria che attraversa il canale di mandata ed essendo nota la sezione dello stesso (dimensioni interne 750x450 mm), è possibile calcolare la portata d'aria in mandata elaborata dal roof top: modulando gli inverter a servizio dei ventilatori di mandata a ripresa aria è possibile ottenere la portata richiesta. Tramite la sonda di velocità, conoscendo la sezione del canale, si calcola in real time la portata d'aria complessiva che il RT sta immettendo nei vari locali:

$$Q_{\text{aria}} = v_{\text{aria}} * S_{\text{equivalente canale}} = [\text{m/s}] * [\text{m}^2] * 3600 = [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$S_{\text{equivalente canale}} 750 \times 450 = \varnothing_{\text{equivalente}} = 630 [\text{mm}] = 0,315 [\text{m}^2]$$

$$v_{\text{aria}} \text{ di progetto (riferita a } Q_{\text{aria}} = 6000 [\text{m}^3/\text{h}]) = 5,3 [\text{m/s}]$$

Un ulteriore controllo di coerenza tra la percentuale di apertura delle serrande a servizio dei vari ambienti e la portata complessivamente elaborata dal roof top è effettuato tramite dei sensori di pressione aria installati a bordo roof top: qualora la pressione raggiunga il valore di soglia massimo ammesso (es. numero elevate di serrande in chiusura e portata aria massima), il controllore modula il ventilatore di immissione riducendo la portata d'aria elaborata dal roof top.

Quando la temperatura ambiente dei vari locali serviti sarà prossima al valore di set (es. 20 °C durante il periodo invernale e 26 °C durante il periodo estivo), verrà ridotta la portata d'aria al minimo (es. 40% di 6000 m³/h): il mantenimento in temperatura degli uffici sarà quindi garantito minimizzando il consumo di energia elettrica.

E' stata inoltre prevista la compensazione della temperatura di mandata aria a seconda della temperatura media ambiente, che va ad agire sul numero di giri del compressore: questa "compensazione" è effettuata in base alla vicinanza delle temperature ambiente rispetto a quelle di set point (questa logica interviene quando T media ambiente entra nella fascia dei ± 2 °C rispetto al set point impostato).

Esempio

Ipotizzando una T_{media ambiente} = 17,6 °C con T_{set point} = 20 °C, il compressore sarà settato al massimo numero di giri, garantendo una temperatura mandata aria pari a 45°C. Se la T_{media ambiente} = 19 °C (rientra nella fascia di ± 2°C rispetto al set point) il compressore inizierà a modulare, riducendo il numero di giri al fine di ottenere una temperatura mandata aria = 40°C (ovvero inferiore di 5°C rispetto al caso precedente).

La variazione massima di set ammissibile, variando il numero di giri del compressore, è di -10 °C nel caso invernale (temperatura mandata aria minima = 35 °C, contro i 45 °C con CMP al massimo), +10 °C nel caso estivo (temperatura mandata aria massima = 26 °C, contro i 16 °C con CMP al massimo).

Analisi energetica di differenti logiche di regolazione

Relativamente ai risultati ottenuti dalle simulazioni sul complesso edificio-impianto con roof top a CO₂, si è riscontrato che tutte le soluzioni alternative proposte - sia in riferimento alle logiche di regolazione che per quanto concerne le modifiche all'impianto nella sua componentistica - determinano un aggravio in termini di energia primaria necessaria e di costi di esercizio. Il motivo è da ricercarsi nell'elevato carattere tecnologico, sia dal punto di vista dei dispositivi che della logica di regolazione, della soluzione già installata.

Gli ulteriori interventi proposti, quindi, sono stati elaborati al fine di migliorare il benessere microclimatico o le condizioni di qualità dell'aria all'interno degli ambienti climatizzati. In particolare, la soluzione alternativa che prevede la sostituzione delle attuali serrande di immissione, con cassette del tipo VAV con resistenze elettriche per il post-riscaldamento dell'aria in ingresso ai singoli ambienti permette di migliorare il benessere microclimatico nel singolo ufficio, garantendo un maggiore numero di ore in condizioni di comfort termico invernale. Questo è stato riscontrato attraverso l'analisi microclimatica effettuata a partire dall'indicatore di prestazione di temperatura, valutato come la percentuale di ore annue, in cui l'impianto è in funzione, nella quale si raggiungono le condizioni di temperatura ritenute di benessere per la stagione in esame. Esso è passato, con riferimento alla stagione invernale, dal valore di 84% del caso base, all'88% del caso con post-riscaldamento elettrico; l'intervento presenta tuttavia dei costi energetici ed economici ben più elevati, che non ne giustificano l'utilizzo. Stesso risultato, con minori penalizzazioni energetiche, si sarebbe avuto optando per cassette VAV con batterie ad acqua calda, ma l'assenza di tale fluido termo-vettore e la necessità di predisporre una rete idronica hanno portato a scartare tale configurazione alternativa.

Impianti a pompa di calore aria - acqua

Analisi energetica di differenti logiche di regolazione

Sono state valutate le seguenti tre configurazioni di "downgrade impiantistico" rispetto alla soluzione già installata per la regolazione:

1. impianto con regolazione solo sui livelli termici del fluido termo-vettore di mandata dalla pompa di calore reversibile, mediante rilevazione da sonda di temperatura posta sul ritorno del fluido termo-vettore alla pompa di calore;
2. impianto con regolazione centralizzata, in cui l'impianto modula la potenza rispetto ai segnali inviati alla pompa di calore da un unico termostato posto in ambiente, ed in particolare posto nell'Aula 1 al piano terra;
3. impianto con regolazione di piano. Tre termostati sono rispettivamente collocati nell'Aula 1 al piano terra, nell'Aula 2 al piano primo, nella Hall impianti al piano seminterrato. Tali controlli termostatici regolano l'apertura/chiusura delle elettrovalvole montate in testa ai collettori di piano, a modulazione della portata veicolata. La regolazione è di tipo "di zona".

Per quanto concerne i risultati ottenuti, anche in questo caso non risulta affatto vantaggioso né dal punto di vista economico né dal punto di vista della qualità del controllo microclimatico, un tipo di gestione non "armonico" rispetto alla innovazione della tecnologia impiantistica.

Tali risultati sono riassunti nelle figure che seguono, relative a: richieste energetiche (Figure 424 e 425), costi di gestione (Figure 426 e 427), controllo microclimatico (Figura 428).

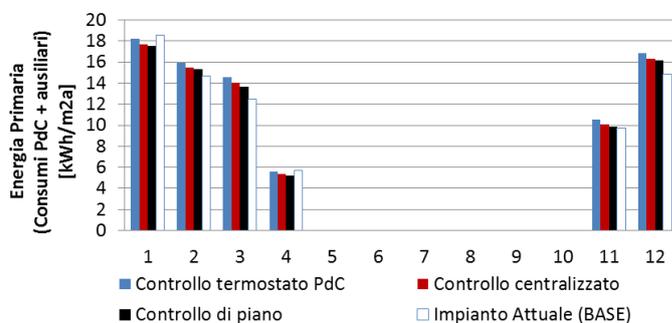


Figura 424. Energia primaria richiesta, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione invernale di una superficie unitaria dell'edificio

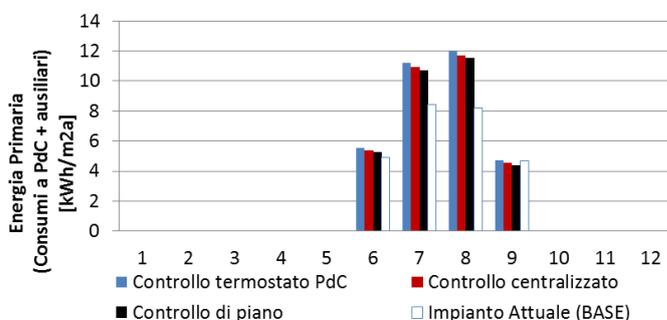


Figura 425. Energia primaria richiesta, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione estiva di una superficie unitaria dell'edificio

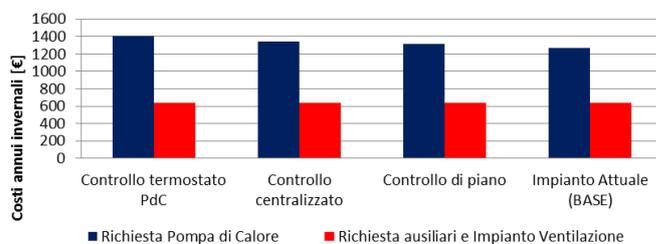


Figura 426. Costi economici, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione invernale dell'edificio

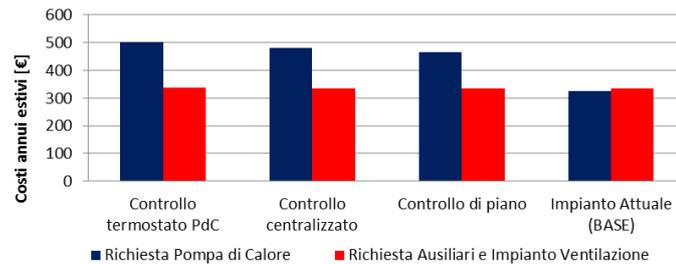


Figura 427. Costi economici, al variare della tipologia impiantistica, per la climatizzazione estiva dell'edificio

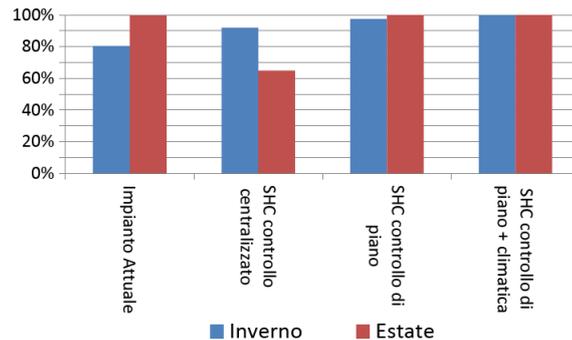


Figura 428. Indicatori di Prestazione di temperatura, relativi alle intere stagioni di riscaldamento e raffrescamento, al variare della tipologia impiantistica

Di seguito, in Tabella 100, si propone un dettaglio dell'analisi di fattibilità tecnico-economica. I costi di installazione dei sistemi di regolazione sono:

- Controllo centralizzato: extra-costi sistema di regolazione stimato in € 350 (risparmio di 93 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente).
- Controllo di piano: extra-costi sistema di regolazione stimato in € 1470 (risparmio di 136 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente).
- Controllo attuale: extra-costi sistema di regolazione stimato in € 2100 (risparmio di 322 €/anno rispetto alla soluzione di riferimento senza controllo ambiente).

Tabella 100. Valori del SPB, DPB, VAN e IP per tutte le soluzioni alternative proposte

	SPB (anni)	DPB (anni)	VAN (€)	IP
Controllo Centralizzato	3,7	4,2	810	2,3
Controllo di Piano	10,8	16,1	225	0,2
Controllo ambiente per ambiente (attuale)	6,5	8,0	1912	2,9

Immediatamente, si nota come ciascun intervento di regolazione migliorata, dal più basilico con termostato centralizzato in unico ambiente di riferimento a quello attuale (ambiente per ambiente), mostrino indici economici soddisfacenti.

In particolare, andando a valutare i costi di investimento (valore attuale netto e il rientro economico attualizzato), emerge che la regolazione prevista per singolo locale ottiene una piena fattibilità tecnico-economica. Attualizzando i flussi di cassa, infatti, è quella che presenta un VAN più alto rispetto a tutte le altre configurazioni, con un indice di profitto pienamente soddisfacente.

a.4 Sviluppo di analisi di sensibilità per stabilire, ai fini dell'effettiva fattibilità economica, le soglie di costo iniziale dei vari componenti costituenti gli impianti sperimentali (solar heating and cooling, pompe di calore ad R744) e delle fonti energetiche tradizionali nonché le eventuali forme d'incentivo necessarie

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modello Matematici (DEIM), che ha curato l'analisi di sensibilità per i vari componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling e con il contributo dell'Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica, Energetica e Gestionale, che ha analizzato i sistemi di climatizzazione a pompa di calore.

ENEA ha curato l'acquisizione e quindi l'elaborazione dei dati sperimentali di funzionamento degli impianti "dimostratori" presenti presso il C.R. ENEA di Casaccia, al fine di ottenere modelli di simulazione dinamica validati (accettando margini d'errore inferiori al 10% rispetto ai dati misurati e quelli ottenuti dalle simulazioni) che sono stati poi utilizzati per le analisi tecnico-economiche sviluppate sui differenti sistemi di climatizzazione.

Sistemi di solar heating and cooling

Oggetto principale dell'attività di ricerca è stato l'individuazione di soglie di costo iniziale dei vari componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling e la valutazione della convenienza economica della tecnologia in questione, a seconda delle differenti zone climatiche ed alla taglia, facendo poi un confronto con impianti di climatizzazione di tipo tradizionale ed a pompa di calore.

E' stato inoltre valutato quanto il presente regime d'incentivazione (*D.M. 28/12/2012, Conto Energia Termico*) sia influente sulla convenienza economica degli impianti di SHC.

In particolare, gli aspetti affrontati sono:

- individuazione ed analisi di sensibilità dei componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling, valutando le differenze di costo a seconda della taglia della macchina frigorifera;
- individuazione ed analisi dei componenti costituenti gli impianti serviti dalla tecnologia del solar heating and cooling, valutando le differenze di costo a seconda della tipologia di terminale ambiente (ad acqua o ad aria);
- valutazione economica di un impianto di solar heating and cooling a seconda della taglia e delle differenti zone climatiche.
- valutazione economica dei costi di gestione di differenti tipi d'impianto;
- individuazione e studio delle criticità economiche dei sistemi di solar heating and cooling, al fine di determinarne l'effettiva fattibilità economica valutando anche il peso dell'attuale regime d'incentivazione (*D.M. 28/12/2012*).

Approccio metodologico

Per effettuare il presente studio, vista anche la necessità di prevedere le prestazioni degli impianti al variare della zona climatica e della taglia, è stato d'aiuto l'uso di un modello numerico. La prima parte dell'attività ha pertanto riguardato la realizzazione di un modello di un impianto di climatizzazione solar heating and cooling e dell'utenza sottoposta. Per calibrare e validare il modello è stato riprodotto un impianto sperimentale di SH&C realizzato presso il C.R. ENEA della Casaccia. L'impianto in questione è stato oggetto di accurate campagne di misura ed acquisizione dati al fine di determinarne le prestazioni. I dati sperimentali sono stati così confrontati con gli output del modello numerico realizzato.

Il software utilizzato è il *Trnsys Studio* ed il *Trnsys Build* che consente l'analisi termo-energetica dinamica degli impianti. L'impianto è stato modellizzato con lo *Studio*, mentre l'edificio sottoposto con la parte *Build* del pacchetto *Trnsys*.

Lo stabile servito dall'impianto di climatizzazione è l'F92 presso il C.R. ENEA della Casaccia. E' una palazzina di tre piani, più seminterrato, in cemento armato, costruita agli inizi degli anni 2000. Le informazioni relative alle dimensioni ed alle caratteristiche termo-fisiche dei materiali adoperati sono state reperite sia grazie alla documentazione disponibile in ENEA sia a seguito di sopralluogo tecnico.

L'F92 è composto da un piano parzialmente seminterrato e due piani con simile divisione planimetrica, speculari, per un totale di 345 m²



Figura 429. Edificio F92 - C.R. ENEA Casaccia

di superficie complessiva. In Tabella 101 sono riportate le proprietà termo-fisiche delle superfici costituenti l'edificio.

Tabella 101. Caratteristiche di trasmittanza strutture opache e trasparenti

Tipo parete	Espos.	Area S m ²	K W/ m ² K	KA W/K	Tipo parete	Espos.	Area S m ²	K W/ m ² K	KA W/K	Tipo parete	Espos.	Area S m ²	K W/ m ² K	KA W/K
Sup. vetrate	N	2,24	2,96	6,63		SE	33,78	0,728	17,44	Sol. PT- muri		39,15	0,04	1,57
	NE	0	2,96	0,00		S	23,95	0,728	21,24	Pav. 1°P-muri		39,15	0,04	1,57
	E	5,04	2,96	14,92		SW	29,18	0,728	22,71	muri-copertura		39,15	0,152	5,95
	SE	6,16	2,96	18,23		W	31,2	0,728	19,31					
	S	3,08	2,96	9,12		NW	26,53	0,728	80,81	Totali				472
	SW	4,48	2,96	13,26	Per, piano Int.*		111	0,728	0,728					
	W	4,88	2,96	14,44	Copertura		96,5	0,523	50,47					
	NW	5,56	2,96	25,00	Ponti Termici									
	Porte(ing+gar)		9,09	2,75	11,71	Fin-serram.		97,69	0,115	11,23				
	Sup. murarie	N	16,09	0,728	30,20	Pilastr-muri		150	0,167	25,05				
	NE	41,48	0,728	23,30	Sol p. Int-p.t.		39,15	0,04	1,57					
	E	32	0,728	24,23	Pav. PT-muri		39,15	0,15	5,87					

* Si tratta dello sviluppo di muro a ridosso dell'intercapedine esterna

L'impianto è in grado, utilizzando la fonte solare, di riscaldare e raffreddare lo stabile. Qualora l'irraggiamento solare non dovesse essere sufficiente una caldaia alimentata a gas metano entra in funzione sopperendo a tale mancanza. D'inverno l'acqua calda prodotta viene accumulata in un puffer e secondo necessità inviata ai terminali d'impianto presenti nell'edificio. In estate l'acqua calda è inviata ad una macchina ad assorbimento H₂O-LiBr che produce acqua refrigerata accumulata in un puffer freddo. In relazione ai bisogni di raffreddamento degli ambienti questa viene inviata all'edificio. I terminali ambiente sono di due tipi, fan coils e pavimento radiante. A seconda della convenienza viene utilizzata l'una o l'altra soluzione. In Tabella 102 vengono riepilogati i dati di targa delle principali macchine costituenti l'impianto.

Tabella 102. Dati di targa apparecchiatura

Componente	Taglia
Campo solare	25 kWt* [56 m ²]
Accumulo Caldo	1500 L
Accumulo Freddo	1000 L
Gruppo ad assorbimento	18 kWf
Torre Evaporativa	43 kWt
Caldaia Integrativa	43,9 kWt
Dissipatore	36 kWt

* Potenza termica media

Inoltre tutto l'impianto è stato dotato di sensori, posti nelle sezioni d'interesse, al fine di monitorare e valutarne le prestazioni energetiche dell'impianto e dunque la convenienza economica.

Il modello

Sono stati dunque realizzati il modello dell'impianto in *Trnsys Studio* e dell'edificio F92 in *Trnsys Build*. E' stato sviluppato un modello numerico per il caso estivo ed uno per il caso invernale. Lo scostamento tra i dati misurati sull'impianto di SH&C presente presso il C.R. ENEA di Casaccia e quelli elaborati numericamente è risultato accettabile al fine della validazione del modello. E' da considerare che i dati climatici impiegati nelle simulazioni sono quelli giornalieri medi mensili desunti dalla UNI 10349:1994 opportunamente elaborati da apposita routine *Trnsys* per "spacchettarli" al livello di step temporale impiegato nelle simulazioni (30 minuti). Tali valori sono riportati in Tabella 103.

Tabella 103. Confronto dati sperimentali con quelli forniti dal modello

	Gas	Sole	Tot	Frazione solare
Fabb. Energ. MISURATO [kWh]	8285	13443	21728	0.62
Fabb Energ. MODELLO [kWh]	7342	12873	20215	0.64

E' doveroso sottolineare però che i dati sperimentali sono relativi all'intero anno, mentre i dati misurati difettano dei mesi di dicembre e gennaio. Comunque è intrinseca una leggera sottostima del modello dovuta soprattutto alle dissipazioni termiche che avvengono nei macchinari e nelle tubazioni dell'impianto non computate nella simulazione. Infatti il modello considera come elementi disperdenti solamente il termodotto che collega l'impianto a l'utenza, gli accumuli, il campo solare e gli scambiatori. Una volta verificato, il modello è stato utilizzato per valutare le prestazioni di impianti di SHC, di differenti taglie, installati in varie zone climatiche, in particolare nelle città di Milano, Roma Napoli e Palermo.

Individuazione ed analisi di sensibilità dei componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling, valutando le differenze di costo a seconda della taglia della macchina frigorifera

E' stata effettuata un'attenta analisi sulla variazione del costo dei componenti principali costituenti gli impianti di solar heating & cooling in reazione alla taglia della macchina ad assorbimento e dunque del componente stesso.

Nei grafici sottostanti (Figura 430) viene mostrato come, all'aumentare della taglia della macchina, il prezzo per unità di potenza vada sensibilmente a diminuire. Questo vale soprattutto per quei componenti che sono particolari degli impianti di SH&C come il campo solare e soprattutto il gruppo ad assorbimento. Da notare come le curve tendono, per grandi taglie ad asintoti orizzontali.

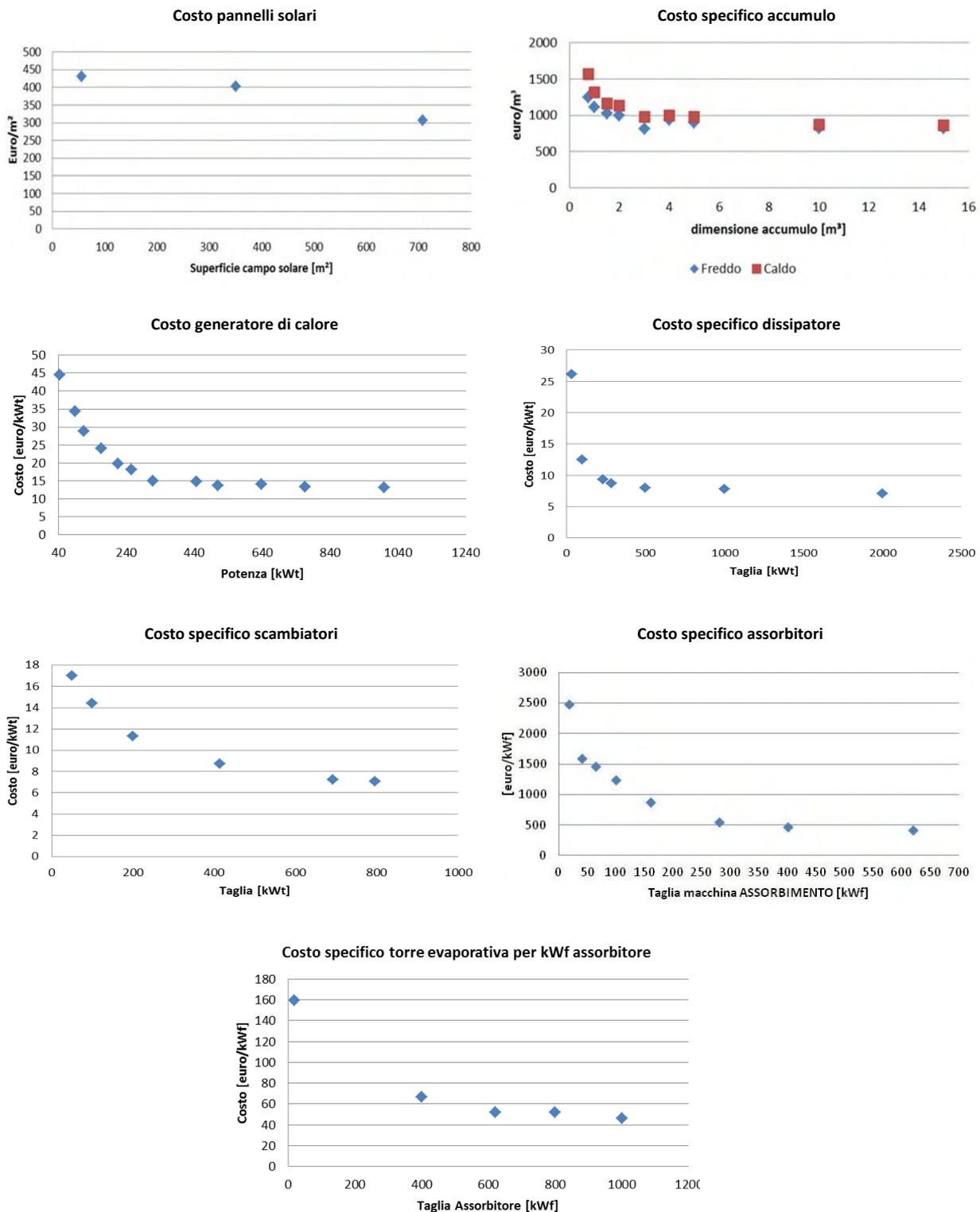


Figura 430. Andamento costo di diversi componenti d'impianto

Un gruppo ad assorbimento per utenze da 18 kWf ha un costo di 44672 €, mentre uno da 280 kWf di 152320 €, passando cioè da 2481 a 544 €/kWf. Questo comportamento di scala vale anche per gli altri componenti

dell'impianto così, un impianto standard completo di SH&C da 18 kWf costa 80000 €, mentre quello da 280 kWf ne costa 472772, passando da un costo di 4444 a 1688 €/ kWf (Figura 431).

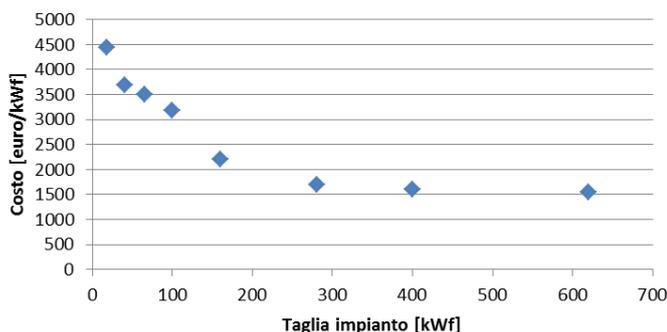


Figura 431. Andamento costo totale impianto di SH&C

Individuazione ed analisi dei componenti costituenti gli impianti serviti dalla tecnologia del solar heating and cooling, valutando le differenze di costo a seconda della tipologia di terminale ambiente (ad acqua o ad aria)

Come noto, gli impianti di solar heating and cooling riescono, convertendo energia proveniente dal sole, a produrre acqua calda che, in configurazione invernale viene accumulata e successivamente inviata attraverso sofisticate logiche di regolazione e secondo opportune rampe di temperatura ai terminali ambiente. Mentre in estate l'acqua calda prodotta alimenta un gruppo ad assorbimento che produce acqua fredda da accumulare ed usare secondo le necessità dell'utenza.

Questo tipo di impianti ben si sposano con terminali ambiente che lavorano a basse temperature ed in particolare con soluzioni a pavimento radiante o a fan coil. La soluzione a pavimento radiante ha il vantaggio di poter lavorare, viste le grandi superfici, con temperature di acqua in ingresso più fredde in inverno e più calde in estate, andando a sfruttare meglio la risorsa solare. Di contro però ha un'inerzia molto lunga e dunque tempi transitori notevoli. I fan coils lavorano sempre a temperature relativamente basse rispetto ai tradizionali radiatori, seppure leggermente più alte del pavimento radiante. Questi terminali consentono in pochi minuti di raggiungere le temperature di set negli ambienti, garantendo comunque, purché installati a regola d'arte, un alto grado di comfort.

Il costo di tali dispositivi è tuttavia differente. In questo studio è stato preso in considerazione un costo mediato rispetto alle indicazioni di mercato.

Nel caso di pavimento radiante il costo del materiale è di circa 111 €/m². Questo valore deve essere maggiorato del 28,7% per spese generali ed oneri d'impresa. E' stato assunto un valore medio di fornitura e posa in opera del 25% sul totale. Questa componente è variabile secondo il sistema adottato per la posa dei tubi. Si giunge così ad un costo totale medio di 180 €/m².

Per i ventilconvettori è stato considerato il modello a cassetta. Il costo medio per un terminale da 4,5 kW è di circa 1020 €. Come nel caso precedente deve essere maggiorato del 28,7% per spese generali ed oneri d'impresa ed del 29% per la fornitura e posa in opera per un totale di 1640 € per macchina. Considerando una superficie servita di 15 m² si ha un costo di circa 110 €/m². I costi non sono comprensivi di IVA.

Valutazione economica di un impianto di solar heating and cooling a seconda della taglia e delle differenti zone climatiche

Parte centrale del presente studio ha riguardato l'analisi di sensibilità delle prestazioni degli impianti di SH&C rispetto alla taglia ed alla zona climatica d'installazione delle macchine. Per effettuare lo studio è stato usato il modello numerico elaborato in Trnsys, andando di volta in volta a modificare i parametri d'interesse. Nel caso in analisi è stato fatto riferimento ad una tipica utenza commerciale adibita ad ufficio per differenti potenze frigorifere e rispetto alle città di Milano, Roma, Napoli e Palermo, ognuna caratteristica di una differente zona climatica. Per le ore di funzionamento degli impianti sono stati distinti il caso invernale ed estivo. Per il periodo di riscaldamento è stato fatto riferimento alla normativa vigente, mentre per il raffrescamento è stato assunto un intervallo convenzionale uguale per tutte le zone climatiche (Tabella 104).

Nelle valutazioni è stato considerato un indice d'inflazione generale dell'energia pari al 3% ed un costo del combustibile per il gas metano pari a 0,093 €/kWh e di 0,2414 € per il kWh elettrico (quadro dei prezzi aggiornato ad aprile 2013).

Tabella 104. Periodo di funzionamento impianti

Città	Zona Climatica	Inverno	Estate
Milano	E	15 ottobre – 15 aprile 7:00 – 17:00	1 giugno – 15 settembre 9:00 -19.00
Roma	D	1 novembre – 15 aprile 7:00 – 17:00	1 giugno – 15 settembre 9:00 - 19.00
Napoli	C	15 novembre – 31 marzo 7:00 – 17:00	1 giugno – 15 settembre 9:00 19.00
Palermo	B	1 dicembre – 31 marzo 7:00 – 17:00	1 giugno – 15 settembre 9:00 -19.00

Il risparmio annuale conseguito è stato stimato nel seguente modo: per il caso invernale i kWh forniti dal sole sono stati considerati come risparmio di gas metano; nel caso estivo i kWh solari sono stati calcolati come risparmio rispetto al caso di un impianto a pompa di calore con un EER (*Energy Efficiency Ratio*), mentre è stato considerato il regime d’incentivazione rispetto al *D.M. del 28 Dicembre 2012*. In Figura 432 è mostrato l’andamento del VAN per impianti di SH&C in relazione alla zona climatica e divisi per taglia.

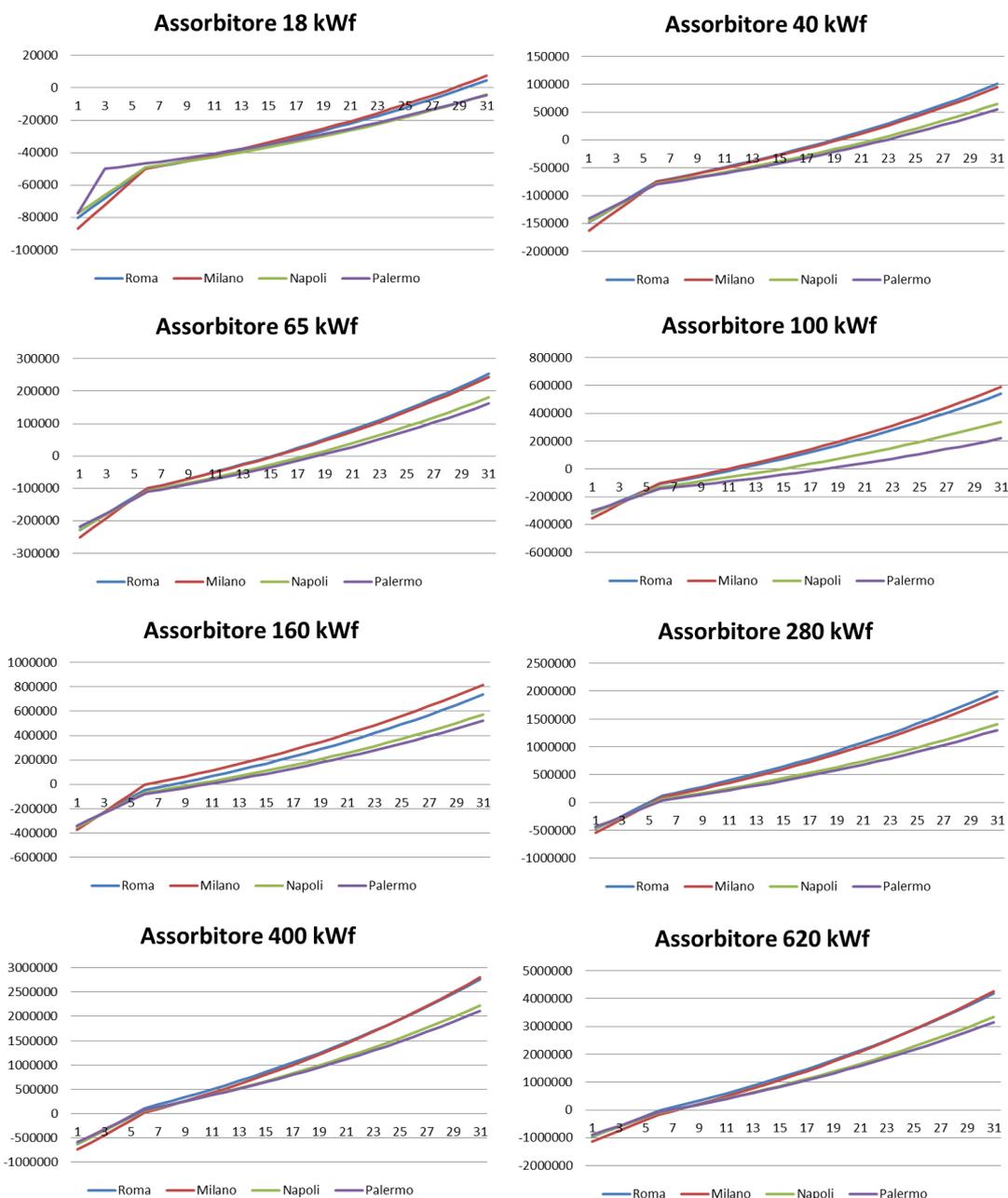


Figura 432. VAN attualizzato per impianti di diversa potenza

E' da notare come gli impianti di solar heating and cooling per risultare convenienti necessitano di grandi taglie. Questo è dovuto a fattori di scala che riducono sensibilmente il prezzo dei componenti al crescere della potenza installata.

E' inoltre importante sottolineare come lo studio sia stato effettuato a parità di potenza della macchina frigorifera. Per ovvie ragioni ciò comporta superfici del campo solare differenti a seconda della posizione geografica nonché l'ammontare degli incentivi ottenuti.

Il tempo di ritorno attualizzato per impianti di piccola taglia è molto alto nonostante siamo in condizioni di regime incentivante. Per l'impianto da 18 kW frigoriferi servono, nelle posizioni geografiche più favorevoli, mediamente 28 anni per raggiungere il pay back time. Per un impianto da 65 kW si arriva a circa 14 anni, mentre viene confermata la tendenza per cui la tecnologia di SH&C inizia a diventare commercialmente attraente per potenze di circa 100 kW, il cui tempo di ritorno atteso è dell'ordine dei 11 anni, valore pertanto confermato anche da alcuni impianti di tale potenza realmente installati da alcuni anni in Italia.

Altro fattore da considerare, legato sempre alla locazione dell'impianto, è il periodo di riscaldamento invernale. Risulta infatti che più la zona climatica è rigida, meglio e più a lungo riesce a sfruttare la risorsa solare, con benefici economici più rilevanti. In estate invece le differenze di temperatura alle varie zone climatiche sono, soprattutto per i mesi di luglio ed agosto, meno rilevanti.

In Figura 433 si riporta l'andamento della frazione solare per le città prese in esame, ovvero quanto, sul fabbisogno totale annuo, contribuisce la fonte solare e quanto la caldaia tradizionale.

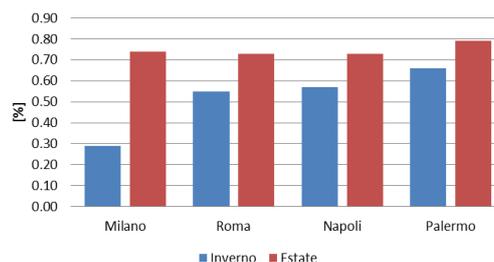


Figura 433. Frazione solare per un impianto SH&C da 18 kWf nelle varie città

Valutazione economica dei costi di gestione di differenti tipi d'impianto

Gli impianti di solar heating and cooling sono progettati per ottenere il miglior compromesso tra costo e prestazioni. In fase di progettazione si cerca dunque di determinare la superficie del campo solare che porti all'ottimo della curva costi-benefici. Questo implica che non sempre il campo solare è in grado di far fronte all'energia termica richiesta dall'edificio. Quando ciò avviene si sopperisce a tale mancanza con fonti energetiche tradizionali che vanno ad alimentare un generatore di calore. In questa analisi il modello è stato usato per determinare la frazione solare ottenuta nel funzionamento d'impianto e quindi stimare quanta energia sul totale è stata fornita dal sole e quanta dal combustibile. E' stato così possibile confrontare i risultati ottenuti con i consumi di impianti tradizionali con caldaia alimentata a gas metano, GPL, gasolio e rispetto al caso in cui l'impianto di SH&C sia integrato con impianto a pompa di calore con COP medio di 3 oppure con caldaia a pellet.

E' tuttavia doveroso specificare come i valori qui riportati siano relativi ai soli costi di gestione per un anno tipo di funzionamento degli impianti, al variare della zona climatica ed della taglia d'impianto e supponendo la medesima efficienza per differenti tipologie di caldaie. I combustibili fossili presi in esame sono il metano, il GPL, il gasolio ed il pellet. E' stato considerato un indice di inflazione generale e dell'energia pari al 3%, ed un costo dei combustibili integrativi pari a: 0,093 €/kWh per il metano, 0,193 €/kWh per il GPL, 0,134 €/kWh per il gasolio, 0,063 €/kWh per il pellet ecologico di abete, nonché 0,2414 per il kWh elettrico (quadro dei prezzi aggiornato ad aprile 2013).

Nelle Figura 434 è riportato l'andamento del costo di gestione annuale (per brevità sono stati riportati i risultati relativi alla città di Roma, ma nel rapporto RdS/2013/091 sono mostrati i

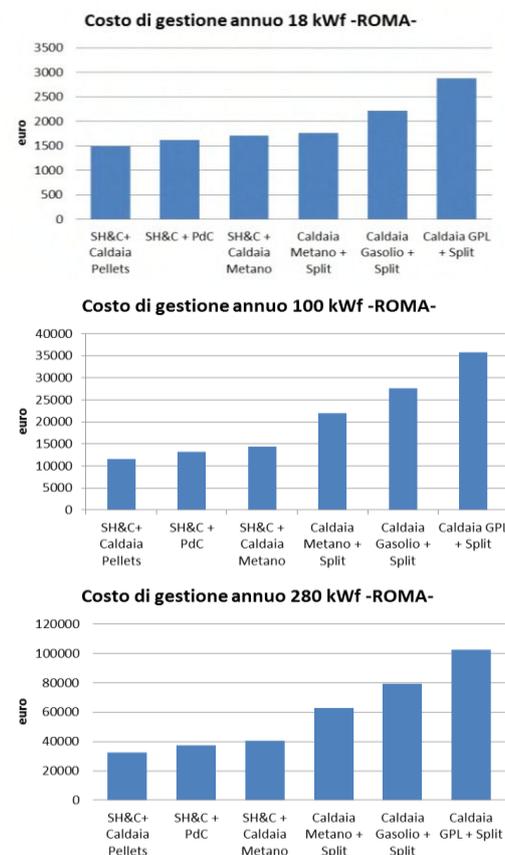


Figura 434. Costo di gestione annuale impianti da 18, 100 e 280 kWf installati a Roma

risultati ottenuti per le varie zone climatiche) ottenuto confrontando le varie soluzioni impiantistiche. In particolare sono stati presi in considerazione impianti di SH&C con caldaia integrativa a gas metano, a pellet, impianti tradizionali a caldaia a metano più split per il raffrescamento estivo, impianti tradizionali con caldaia a GPL, a gasolio, sempre integrati con sistema a split. In ultimo è stato valutato il caso di impianto di solar heating and cooling integrato con pompa di calore o caldaia a pellet. E' stato considerato il consumo elettrico degli ausiliari solo per gli impianti di SH&C i cui valori sono stati valutati con il modello numerico, mentre nei casi di caldaia e split è stato considerato il combustibile della caldaia ed il solo consumo elettrico imputabile agli split.

E' interessante notare come la soluzione più economica risulti per la maggior parte delle situazioni l'integrazione tra caldaia a pellet e SH&C, vantaggio che va via via aumentando al crescere della taglia dell'impianto. In situazioni come quelle della città di Palermo, soprattutto per i piccoli carichi, dove è preponderante il funzionamento dell'impianto in raffrescamento estivo e dove quindi il prezzo del combustibile per il riscaldamento ha poca influenza, mentre pesa molto di più la corrente utilizzato per il raffrescamento, risulta più conveniente la soluzione caldaia a metano con split. Questo anche perché nel caso di SH&C, nonostante parte della richiesta sia soddisfatta dal sole, vi sono comunque degli assorbimenti elettrici non trascurabili da parte degli ausiliari d'impianto che lo rendono nel complesso più costoso nella gestione. Situazione che si stabilizza per potenze maggiori, dove il SH&C con caldaia a pellet risulta sempre la soluzione più vantaggiosa. Altro aspetto, comunque qui non valutato, è il possibile trend di aumento del prezzo del pellet che in questi anni, vista la costante crescita della domanda, potrebbe aumentare con tassi maggiori rispetto a quelli degli altri combustibili.

In Figura 435 è presentato un riepilogo dei costi di gestione stimati per tutte le località analizzate, per differenti potenze frigorifere dell'impianto considerato.

Soglie di costo iniziale dei principali componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling

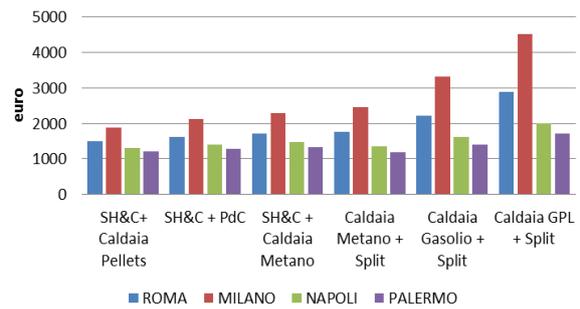
Lo studio ha inoltre tentato di dare una risposta circa i costi minimi per kWf degli impianti di solar heating and cooling al fine di ottenere un ragionevole tempo di ritorno dell'investimento, supposto di anni 10. In Tabella 105 è riportato il valore del costo per kWf che l'impianto dovrebbe avere per conseguire tale obiettivo. I casi analizzati sono, tra gli studiati, quelli di taglia inferiore ai 100 kWf di per sé già soddisfacenti.

Tabella 105. Costo stimato dell'impianto di SH&C per avere un tempo di recupero attualizzato (TRA) di circa 10 anni

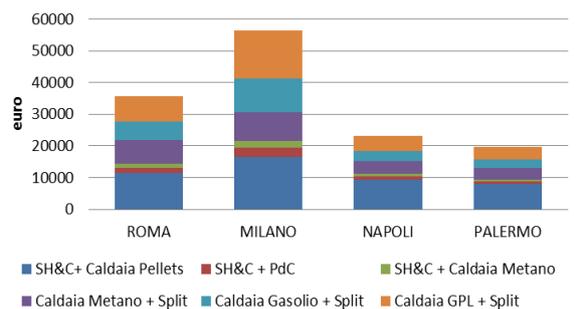
Taglia [kWf]	Condizione	Costo [€]	Anni	Costo specifico [€/kWf]	Rispetto ad Io [%]
18	originale [Io]	80000	28	4444	0,48
	TRA - 10 anni	38125	10	2118	
40	originale [Io]	147587	18	3689	0,64
	TRA - 10 anni	94113	10	2352	
65	originale [Io]	218186	16	3356	0,67
	TRA - 10 anni	146103	10	2247	

I componenti costituenti gli impianti di SH&C sono già di larga diffusione, eccezion fatta per il gruppo ad assorbimento. E' ipotizzabile che è proprio l'assorbitore il componente da dover ottimizzare per conseguire un

Costo gestione annuo per 18 kWf



Costo gestione annuo per 100 kWf



Costo gestione annuo per 280 kWf

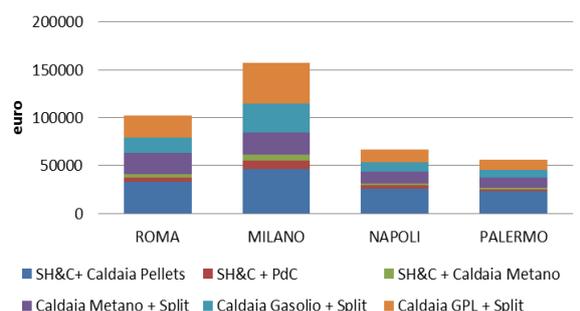


Figura 435. Costo di gestione annuale impianti da 18, 100 e 280 kWf per varie zone climatiche

miglioramento del tempo di ritorno, il cui costo deve sensibilmente scendere al fine di raggiungere prestazioni economicamente vantaggiose. Infatti si potrebbe pensare ad un possibile abbassamento del prezzo della torre evaporativa e del campo solare. La torre evaporativa ha un peso di circa il 6% dell'investimento per l'impianto da 18 kWf di Roma, quindi anche una sostanziale riduzione del prezzo di questo componente non darebbe benefici tangibili. Il costo del campo solare ha invece più peso sul complessivo dell'investimento (*Io*), in Tabella 106 ne è stato valutato il valore rispetto al totale:

Tabella 106. Costo del campo solare sul totale dell'investimento

Taglia [kWf]	Costo campo solare su <i>Io</i> [%]
18	0,30
40	0,36
65	0,35

E' ben evidenziato come all'aumentare della taglia la percentuale aumenta perché si riduce il peso della macchina ad assorbimento. Comunque, a meno di scoperte tecnologiche che portino all'uso di nuovi materiali più economici o al sostanziale aumento dei rendimenti non è prevedibile un'importante riduzione del costo dei pannelli solari per kWt.

Il componente chiave per il raggiungimento del costo limite rimane dunque il gruppo ad assorbimento. Se si ipotizzasse che tutto il risparmio venisse conseguito sul costo del gruppo ad assorbimento la situazione sarebbe quella evidenziata in Tabella 107 in cui è evidenziato quanto il costo dell'assorbitore dovrebbe scendere per avere un tempo di ritorno di circa 10 anni.

Tabella 107. Costo assorbitore per un tempo di recupero attualizzato di 10 anni

Taglia [kWf]	Condizione	Costo <i>Io</i> [€]	Costo assorbitore [€]	Costo specifico assorbitore [€/kWf]	Riduzione [%]
18	originale	80.000	44.672	2.481	94
	TRA - 10 anni	38.125	2.797	155	
40	originale	147.587	63.660	1.591	84
	TRA - 10 anni	94.113	10.186	254	
65	originale	218.186	95.347	1.467	76
	TRA - 10 anni	146.103	23.264	357	

Per queste taglie d'impianto risulta così necessaria una grande riduzione del costo del gruppo ad assorbimento al fine di ottenere i valori di pay back time voluti.

I valori qui mostrati non considerano il consumo elettrico degli impianti. Questo perché l'impianto su cui il modello è stato tarato è un impianto con macchine a logica on/off. Senza dispositivi elettronici, oggi di largo impiego, che consentano il raggiungimento di un'elevata efficienza dell'impianto, soprattutto verso quei componenti più energivori come il dissipatore e la torre evaporativa i benefici degli impianti di SH&C verrebbero a mancare perché l'energia elettrica utilizzata dagli ausiliari d'impianto sarebbe molto elevata e capace al limite di alimentare tradizionali macchine a pompa di calore.

Per completezza nella Figura 436 è riportato l'assorbimento elettrico di un impianto di SH&C da $P_f=18$ kW, dotato di apparecchiature on-off (impianto non ottimizzato). Si noti che nel mese di aprile il riscaldamento è in funzione solo nelle città di Roma e Milano, mentre per il mese di maggio gli impianti sono in off in tutte le località. Nel mese di ottobre il riscaldamento è in funzione solo a Milano: si evidenzia quindi l'importanza del ricorso ad apparecchiature dotate di inverter (specie torre evaporativa e dissipatore) specie per le località con periodo di accensione degli impianti più lungo.

Conclusioni

La realizzazione del modello numerico con il software *Trnsys Studio* e *Trnsys Build* di un impianto di solar heating and cooling e la sua successiva validazione grazie al confronto diretto con dati sperimentalmente acquisiti da

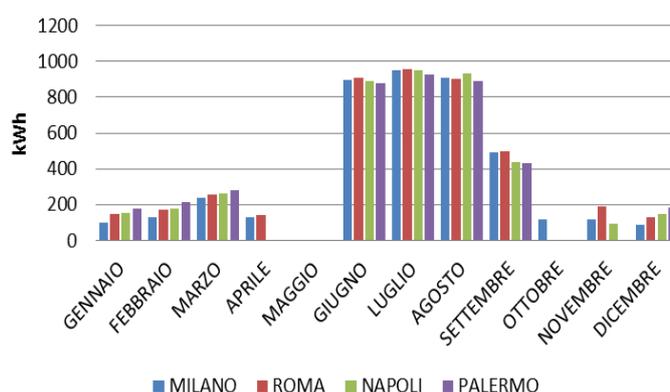


Figura 436. Assorbimento elettrico per un impianto SH&C da 18 kWf

un impianto pilota realizzato presso il C.R. ENEA di Casaccia ha fornito uno strumento molto potente per compiere con accuratezza lo studio oggetto dell'accordo di collaborazione tra l'ENEA e l'Università di Palermo. Partendo da dati di letteratura è stato valutato come il costo medio dei principali componenti d'impianto vari in relazione alla potenza di targa, andando poi a definire per l'impianto tutto un costo specifico riferito al kWh installato.

Ha poi fatto seguito un confronto tra terminali ambiente ad acqua con quelli ad aria. Il pavimento radiante utilizza meglio la fonte solare a discapito però di lunghi transitori ed un costo per m² notevolmente più alto, mentre i fan coil hanno il vantaggio di un minor costo e tempi di regolazione, ma lavorano con temperature leggermente più alte e dunque meno fruttano la risorsa rinnovabile. Gli impianti di SH&C sono sempre assistiti da un generatore di calore. È stata ricercata la soluzione più vantaggiosa per fornire tale integrazione energetica. A seguito dell'analisi è stato valutato che il combustibile più conveniente risulta essere il pellet biologico, seguito dal gas metano rispetto al GPL ed al gasolio.

È stata inoltre valutata l'influenza della posizione geografica sulle prestazioni degli impianti di SH&C e quindi anche sulla convenienza economica. È risultato che per città con climi più rigidi vi è un vantaggio economico dovuto essenzialmente a due fattori. Il primo è che il confronto è stato effettuato a parità di potenza della macchina ad assorbimento, con conseguenti maggiori superfici di campo solare al nord, cui competono più incentivi. Il secondo è dovuto alle maggiori escursioni di temperatura in inverno per le città settentrionali, nonché di un periodo di funzionamento dell'impianto in modalità heating più lungo e quindi di un miglior utilizzo della fonte solare. Differenze che sono meno marcate in estate. In ultimo l'analisi di come gli incentivi secondo il *D.M. del 28 Dicembre 2012* influenzano la convenienza della tecnologia ed il peso del consumo elettrico sul VAN e TRA. Lo studio mostra come per la sopravvivenza e la diffusione del SH&C è indispensabile il mantenimento del regime d'incentivazione.

L'attività di ricerca si conclude valutando, secondo il modello realizzato, l'assorbimento elettrico dell'impianto e come esse condizionano le prestazioni economiche dell'impianto. I dati qui mostrati sono da considerarsi secondo le premesse fatte, ovvero macchinari energeticamente poco efficienti. I tempi di ritorno stimati sono dunque pessimistici. Data la presenza di macchinari d'impianto particolarmente energivori (dissipatore e torre evaporativa) risulta di fondamentale importanza l'uso di componenti attenti all'efficienza energetica.

Sistemi di climatizzazione a pompa di calore

Nel seguito è riportata una sintesi dell'analisi energetica-economica di un sistema edificio-impianto utilizzando impianti di climatizzazione a pompa di calore (comprese le pompe di calore elettriche ad R744). Sono state analizzate per un edificio di riferimento due prototipi di pompe di calore ad R744 (una pompa di calore polivalente acqua-acqua per applicazioni di climatizzazione invernale, e una pompa di calore aria-acqua per sole applicazioni di riscaldamento) e due macchine di tipo commerciale ad R410a. Le prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto sono state valutate impiegando il software di simulazione dinamica TRNSYS vs 17, la cui natura modulare consente di valutare nel dettaglio l'interazione tra le varie componenti impiantistiche con l'edificio considerato. Il presente studio è di natura parametrica in quanto le prestazioni del sistema sono state quantificate al variare di:

- condizioni climatiche dell'ambiente esterno, sono stati presi come riferimento i dati relativi a 4 differenti zone climatiche del territorio italiano: Milano (E), Roma (D), Napoli (C) e Palermo (B);
- tipo di terminale di erogazione, simulando l'edificio di riferimento con tre differenti sistemi di emissione del calore: radiante (35°C), ventil-convettore (50°C) e radiatore (70°C);
- potenza della pompa di calore, valutando le prestazioni ottenibili con macchine da 15 kW, 30 kW e 50 kW considerando più edifici di riferimento all'aumentare della potenza termica erogata dalla macchina.

La scelta delle taglie delle pompe di calore oggetto dell'attività di ricerca è stata effettuata analizzando i dati ottenuti dall'*Indagine statistica sul mercato dei componenti per impianti di condizionamento dell'aria - rilevazione annuale sul fatturato. risultati anno 2012*, effettuata dalla COAER (Associazione Costruttori di Apparecchiature ed Impianti Aeraulici) che ha gentilmente trasmesso i dati ad ENEA.

Considerando i sistemi split (mono e multi), in Figura 436 si può vedere lo scenario di riferimento. La fascia di potenza di riferimento, largamente più installata in Italia, è compresa tra $5 \text{ kW} \leq P_t \leq 17 \text{ kW}$.

Se si escludono i sistemi split (che spesso sono utilizzati per condizionare gli ambienti durante il periodo estivo, ma non costituiscono l'unico impianto di riscaldamento per il periodo invernale), si ottengono due fasce di potenza maggiormente installate. Se infatti non vengono considerati i sistemi split (mono e multi) che comunque nascono in pompa di calore, in Figura 438 si può vedere lo scenario di riferimento.

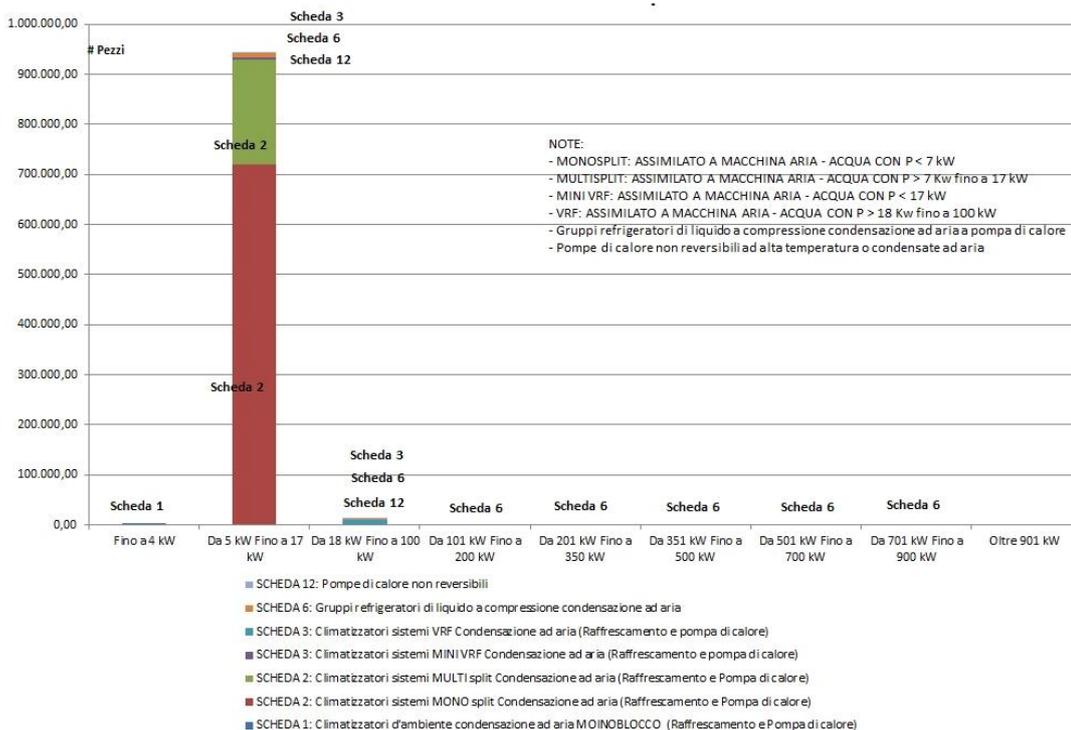


Figura 437. Numero di PDC venduti in Italia (prodotti in Italia o importati) nell'anno 2012, compresi sistemi split e multi-split

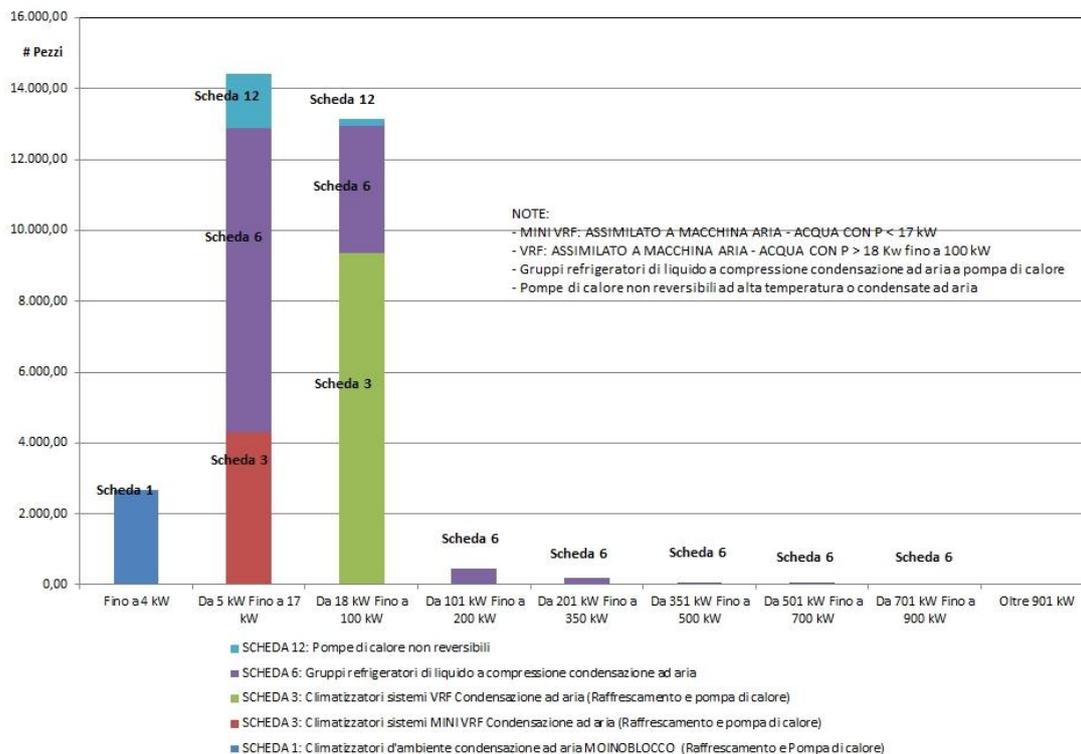


Figura 438. Numero di PDC venduti in Italia (prodotti in Italia o importati) nell'anno 2012, esclusi sistemi split e multi-split

In questo caso le fasce di potenza di riferimento diventano due:

- $5 \text{ kW} \leq P_t \leq 17 \text{ kW}$;
- $18 \text{ kW} \leq P_t \leq 100 \text{ kW}$.

Si è pertanto deciso di analizzare macchine di potenza termica pari a 15, 30 e 50 kW.

Le prestazioni ottenute dalle macchine ad R744 sono state confrontate con quelle fornite da analoghe pompe di calore elettriche tradizionali impieganti R410a sia acqua-acqua e sia aria-acqua.

L'analisi economica è stata sviluppata per entrambe le tipologie di macchina al fine di valutare la bontà degli investimenti con riferimento agli indici VAN (Valore Attuale Netto) e TRA (Tempo di Recupero Attualizzato), confrontando le prestazioni offerte dalle pompe di calore con sistemi di generazione tradizionali impieganti caldaie tradizionali e condensanti alimentate da tre fonti primarie (metano, GPL e gasolio). Nell'analisi economica è stato considerato l'attuale campo tariffario delle fonti energetiche primarie, e per l'energia elettrica si è valutata l'incidenza della tariffa progressiva e quella per contatore dedicato alla pompa di calore (D2/D3 + BTA). Infine è stata considerata l'incidenza dell'attuale piano di incentivazione economica previsto per la sostituzione dei sistemi di generazione esistenti con pompe di calore ("Conto Termico").

L'edificio di riferimento è la "Scuola delle energie edificio F92", ubicato c/o il centro ENEA Casaccia, dotato di fonti endogene di calore (apparecchiature più persone fisiche) e, nell'ipotesi di impiegare macchine polivalenti, di un sistema di ventilazione meccanica alla cui portata è affidato il controllo dei carichi frigoriferi. L'impianto costituito dalle macchine polivalenti è dotato di due serbatoi inerziali che fungono da sorgenti: uno caldo, da cui si estrae l'energia termica richiesta per i terminali di erogazione e per l'UTA, e uno freddo che eroga energia frigorifera utilizzata per alimentare la batteria fredda della stessa UTA. Particolarità del sistema è la presenza di un dry-heater il cui compito è quello di riscaldare, utilizzando l'aria esterna, la portata proveniente dal lato freddo della pompa di calore nel caso in cui il serbatoio freddo è giunto a saturazione. E' presente un sistema di integrazione ausiliario per il riscaldamento (caldaia tradizionale o a condensazione in funzione del tipo di analisi economica svolta), che interviene ogni volta che la pompa di calore non può essere operativa. L'impianto costituito dalle pompe di calore aria-acqua impiega solo un serbatoio inerziale caldo, all'interno del quale è riversata l'energia termica fornita dal sistema integrativo in caso di raggiungimento della temperatura bivalente o di temperatura operativa limite con contemporanea richiesta di riscaldamento.

Individuazione ed analisi di sensibilità per le PDC valutando le differenze di costo a seconda della taglia e della tecnologia della macchina

Lo studio ha messo a confronto le prestazioni di tre differenti taglie di macchine a pompa di calore, del tipo acqua-acqua polivalente ed aria-acqua. In Figura 439 è riportato l'andamento del costo per kW installato a seconda della taglie e tipologia di PDC.

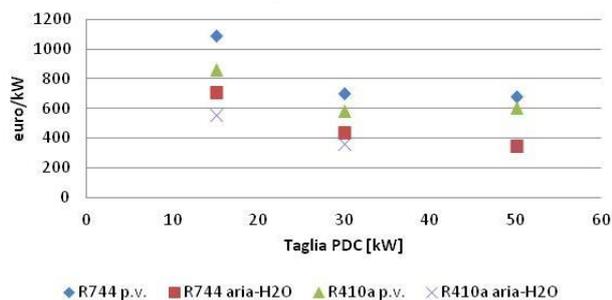


Figura 439. Costo specifico PDC rispetto alla taglia e alla tecnologia

Influenza dei terminali d'impianto sulle prestazioni dei sistemi a pompa di calore

I dati climatici impiegati nelle simulazioni sono quelli giornalieri medi mensili desunti dalla UNI 10349:1994 opportunamente elaborati da apposita routine TRNSYS per "spacchettarli" al livello di step temporale impiegato nelle simulazioni (6 minuti). Altre simulazioni preliminari hanno consentito di mettere a punto una opportuna strategia di controllo (mediante controllori differenziali con isteresi) che consente di ottimizzare le prestazioni del sistema: più in particolare sono state usate come variabili di controllo i livelli di temperatura nei due serbatoi, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria interna (per il controllo della UTA) e la temperatura dell'aria esterna. Il componente più delicato nell'intero sistema è la pompa di calore: quest'ultima, per essere simulata (libreria TESS fornita per TRNSYS), deve poter accedere mediante file esterno ai valori del fattore correttivo del COP in funzione delle temperature disponibili alle sorgenti. Tale file è stato implementato per la macchina polivalente R744 grazie ai valori sperimentali disponibili con l'esercizio della pompa di calore R744 assemblata presso il centro ENEA Casaccia, mentre per le pompe di calore aria-acqua mediante le curve caratteristiche di modelli sperimentali e commercialmente disponibili. Per ciò che concerne la correzione del COP in funzione del fattore di carico FC, si è fatta l'ipotesi di utilizzare un valore unitario in quanto le macchine simulate sono tutte dotate di inverter sul gruppo di compressione.

A titolo d'esempio (il rapporto RdS/2013/091 specifica nel dettaglio tutti gli scenari esaminati) si riporta di seguito l'analisi della pompa di calore ad R744 del tipo aria-acqua.

Tabella 108. Energie (in kWh/stagionali) calcolate per le pompe di calore R744 aria-acqua con terminali di tipo radiante

		(A)	(B)	(C)	(E)	(F)	(G)	(I)
Milano	15 kW	20792,2	6792,7	22258,0	144,6	1719,3	3,06	7,7%
Roma		12721,9	3973,0	12594,1	112,7	20,7	3,20	0,2%
Napoli		8776,5	2660,0	8663,6	109,8	0,0	3,30	0,0%
Palermo		7633,2	2301,7	7524,4	109,5	0,0	3,32	0,0%
Milano	30 kW	41110,2	13666,2	44391,1	144,6	3507,1	3,01	7,9%
Roma		25296,0	8042,0	25175,9	112,7	44,7	3,15	0,2%
Napoli		17497,3	5399,1	17362,1	109,8	0,0	3,24	0,0%
Palermo		15224,5	4674,8	15096,9	109,5	0,0	3,26	0,0%
Milano	50 kW	54255,4	18146,8	58729,1	144,6	4639,7	2,99	7,9%
Roma		42049,9	13460,7	41994,6	112,7	71,9	3,12	0,2%
Napoli		29120,3	9050,2	29005,1	109,8	0,0	3,22	0,0%
Palermo		25352,9	7840,3	25237,1	109,5	0,0	3,23	0,0%

Tabella 109. Energie (in kWh/stagionali) calcolate per le pompe di calore R744 aria-acqua con ventil-convettori

		(A)	(B)	(C)	(E)	(F)	(G)	(I)
Milano	15 kW	20871,7	6896,1	22286,6	144,6	1722,4	3,03	7,7%
Roma		12819,7	4050,8	12610,9	112,7	15,1	3,16	0,1%
Napoli		8848,1	2712,6	8667,2	109,8	0,0	3,26	0,0%
Palermo		7687,6	2345,4	7521,3	109,5	0,0	3,28	0,0%
Milano	30 kW	41135,3	13830,4	44401,7	144,6	3525,9	2,97	7,9%
Roma		25305,7	8137,4	25164,5	112,7	41,2	3,11	0,2%
Napoli		17494,4	5460,4	17338,1	109,8	0,0	3,20	0,0%
Palermo		15217,9	4727,2	15067,0	109,5	0,0	3,22	0,0%
Milano	50 kW	54293,0	18362,1	58727,5	144,6	4641,7	2,96	7,9%
Roma		42083,0	13623,6	41993,1	112,7	70,6	3,09	0,2%
Napoli		29147,6	9162,6	29004,0	109,8	0,0	3,18	0,0%
Palermo		25378,5	7938,5	25236,0	109,5	0,0	3,20	0,0%

Tabella 110. Energie (in kWh/stagionali) calcolate per le pompe di calore R744 aria-acqua con radiatori

		(A)	(B)	(C)	(E)	(F)	(G)	(I)
Milano	15 kW	20815,9	6950,8	22320,6	144,6	1847,6	2,99	8,3%
Roma		12706,7	4056,3	12639,8	112,7	176,3	3,13	1,4%
Napoli		8697,8	2696,2	8678,2	109,8	191,7	3,23	2,2%
Palermo		7644,2	2358,0	7522,3	109,5	92,6	3,24	1,6%
Milano	30 kW	41319,8	14026,3	44541,1	144,6	3553,3	2,95	8,0%
Roma		25260,4	8208,3	25123,0	112,7	96,8	3,08	0,4%
Napoli		17467,4	5511,0	17312,5	109,8	46,8	3,17	0,3%
Palermo		15134,1	4753,3	15040,2	109,5	98,8	3,18	0,7%
Milano	50 kW	54348,3	18585,7	58733,9	144,6	4677,8	2,92	8,0%
Roma		42125,7	13784,8	41996,5	112,7	102,8	3,06	0,2%
Napoli		29148,6	9262,9	29005,4	109,8	70,2	3,15	0,2%
Palermo		25397,3	8031,2	25236,8	109,5	52,9	3,16	0,2%

Legenda

- (A) Energia termica erogata
- (B) Energia elettrica assorbita
- (C) Energia termica estratta dal serbatoio caldo (caricato sia dalla pompa di calore che dal sistema ausiliario)
- (D) Energia frigorifera prodotta dal lato sorgente fredda durante il funzionamento invernale (per le sole macchine polivalenti)
- (E) Energia elettrica assorbita da tutti gli ausiliari (pompe di circolazione e dry-heater per le sole macchine polivalenti)
- (F) Energia di integrazione
- (G) COP medi stagionali della pompa di calore
- (H) SEER (rapporto tra l'energia termica e frigorifera rispetto all'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore) per le sole macchine polivalenti
- (I) Frazione di fabbisogno di energia termica coperta mediante il sistema integrativo

Emerge subito una diminuzione del COP con l'aumento della temperatura di alimentazione dei terminali; è da evidenziare che tale variazione è risultata essere comunque più contenuta rispetto a quella rilevata per la pompa di calore polivalente R744. Le percentuali di energia integrativa tendono a diminuire man mano che il clima della località considerata tende ad essere più mite, e si annullano per Napoli e Palermo nel caso di pompe di calore collegate a terminali a bassa e media temperatura.

Valutazione economica di un impianto a pompa di calore a seconda della taglia e delle differenti zone climatiche

L'analisi economica è stata condotta valutando degli indici VAN e TRA, sia per macchine R744 che R410a, nell'ipotesi di sostituire sistemi di generazione a caldaia tradizionale e a condensazione. Tale analisi è importante in quanto la realizzazione delle pompe di calore operanti ad anidride carbonica necessita l'adozione di soluzioni particolari, causate principalmente dalle elevate pressioni di esercizio richieste per la successiva fase di raffreddamento della CO₂, che rendono il costo iniziale di queste macchine più elevato rispetto alle pompe di calore elettriche tradizionali. Nell'analisi economica è stato utilizzato un quadro che prevede i seguenti indici:

- tasso di sconto del committente 5% (si assume di non dover ricorrere a nessun strumento finanziario per sostituire l'impianto esistente con quello utilizzando una pompa di calore),
- indice di inflazione generale e dell'energia pari al 3%;
- costo dei combustibili alternativi e integrativi: 0,093 €/kWh per il metano, 0,193 €/kWh per il GPL e 0,134 €/kWh per il gasolio (prezzi aggiornati ad aprile 2013);
- con tariffa progressiva D3, costo dell'energia elettrica (comprensiva di costi di dispacciamento e oneri vari) pari a 0,1839 €/kWh per consumi fino a 1880 kWh/anno, 0,20082 €/kWh per consumi fino a 2640 kWh/anno, 0,2414 €/kWh per consumi fino a 4440 kWh/anno e 0,28227 €/kWh oltre i 4440 kWh/anno. Inoltre sono stati considerati costi fissi di 43,5 €/anno e di 15,3 €/kW di potenza impegnata;
- con contatore dedicato, costo di 0,16247 €/kWh più costi fissi (comprensivi della consumi fissi) del secondo contatore di 489,8 € per le taglie da 15 kW (D2+BTA), € 741,2 per la taglia da 30 kW (D3+BTA) e infine di 863,9 € per la taglia da 50 kW (si sono ipotizzate potenze elettriche impegnate rispettivamente di 6, 12 e 20 kW rispettivamente per le pompe di calore da 15, 30 e 50 kW);
- rendimento globale medio stagionale pari a 0,8 per caldaie tradizionali a metano e GPL e 0,7 per caldaia tradizionale a gasolio, e pari a 1 per caldaie a condensazione a metano e GPL e 0,9 per caldaia a condensazione a gasolio;
- costo iniziale delle pompe di calore polivalenti R744: 16.386 €, 21.115 € e 33.822€ rispettivamente per le potenze termiche nominali di 15, 30 e 50 kW;
- costo iniziale delle pompe di calore polivalente R410a: 12.912 € , 17.437 € e 30.025 € rispettivamente per le potenze termiche nominali di 15, 30 e 50 kW;
- costo iniziale delle pompe di calore aria-acqua R744: 10.610 €, 13.045 € e 17.370 €rispettivamente per le potenze termiche nominali di 15, 30 e 50 kW;
- costo iniziale delle pompe di calore aria-acqua R410a: 8.360 €, 10.773 € e 17.256 € rispettivamente per le potenze termiche nominali di 15, 30 e 50 kW.

L'analisi economica ha contemplato come ricavi i risparmi conseguiti con la pompa di calore rispetto ai costi che occorrerebbe sostenere impiegando il sistema di generazione esistente (costo del metano, GPL, gasolio), l'incentivo fruibile mediante il conto termico (di durata pari a 2 anni per le taglie da 15 e 30 kW e 5 anni per la taglia da 50 kW) e il risparmio ottenuto nelle macchine polivalenti con la produzione di energia frigorifera (ipotizzando che nel sistema originario, oltre alla presenza di una caldaia per la produzione di energia termica, sia presente una pompa di calore elettrica con EER medio stagionale di 3,3 per la produzione di energia frigorifera). I costi considerati sono quelli da sostenere per il sistema di integrazione.

A titolo d'esempio (il rapporto tecnico complessivo specifica nel dettaglio tutti gli scenari esaminati) si riporta, per i soli terminali a bassa temperatura, i risultati ottenuti con le pompe di calore aria-acqua ad R744 (caso attuale tariffa elettrica con impiego contatore dedicato) nell'ipotesi di sostituzione di impianti esistenti con caldaia tradizionale oppure a condensazione. Tale forma tariffaria dell'energia elettrica dà luogo a vantaggi sia in termini di VAN che di TRA (Tabella 111).

Tabella 111. VAN al 20° anno e TRA per la pompa di calore aria-acqua R744 , con contatore dedicato ottenuti mediante confronto con sistemi di generazione impieganti sia caldaie tradizionali che caldaie a condensazione, in funzione della località e per tre differenti tipi di combustibili fossili

	T _{alim}	MILANO		ROMA		NAPOLI		PALERMO		
		Caldaia tradizionale	Caldaia condensazione							
Metano	VAN (€)	11193	530	867	-5661	-4876	-9374	-6841	-10747	15 kW
	TRA (anni)	10	20	19	-	-	-	-	-	
GPL	VAN (€)	68523	46394	35962	22415	19304	9971	14161	6054	
	TRA (anni)	3	4	5	7	8	11	10	14	
Gasolio	VAN (€)	45673	26163	21974	10031	9667	1437	5790	-1357	
	TRA (anni)	4	6	7	11	11	18	14	-	
Metano	VAN (€)	34214	12988	13852	804	3395	-5618	-2048	-9004	30 kW
	TRA (anni)	6	10	10	19	16	-	-	-	
GPL	VAN (€)	148333	104283	84000	56923	51010	32304	35345	20912	
	TRA (anni)	2	2	3	4	4	6	6	8	
Gasolio	VAN (€)	102848	64012	56041	32168	31695	15202	20442	7716	
	TRA (anni)	2	3	4	6	6	10	8	14	
Metano	VAN (€)	47259	19177	21218	5834	14064	-994	7860	-5243	50 kW
	TRA (anni)	5	10	9	15	12	-	15	-	
GPL	VAN (€)	198237	139959	103930	72003	95026	63775	78303	51112	
	TRA (anni)	2	3	3	4	4	5	4	6	
Gasolio	VAN (€)	86681	56651	70964	42815	62757	35204	50226	26253	
	TRA (anni)	3	4	4	6	5	7	6	9	

Soglie di costo iniziale dei principali componenti costituenti gli impianti a pompa di calore

La determinazione delle percentuali di riduzione dei costi delle macchine polivalenti R744 acqua-acqua richieste per ottenere indicatori economici comparabili con quelle delle analoghe macchine R410a è poco attuabile se il combustibile di riferimento è il metano; in tal caso, sono richieste riduzioni del costo iniziale dell'ordine del 70%, anche in presenza di temperature di alimentazione dei terminali più vantaggiose (35 °C). Risultati più favorevoli sono ottenuti considerando caldaie tradizionali alimentate a GPL, con percentuali richieste di riduzione dei costi del 20% per potenze installate di 50 kW e applicazione di tariffe elettriche di tipo progressivo. In Figura 440 è riportato l'andamento della riduzione percentuale dei costi nell'ipotesi migliore, vale a dire tariffa elettrica per contatore dedicato e potenza installata di 50 kW.

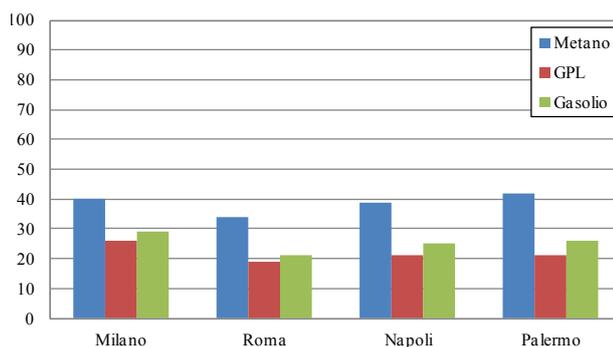


Figura 440. Percentuali di riduzione del costo iniziale da applicare alla pompa di calore polivalente R744 acqua-acqua da 50 kW rispetto ad una equivalente macchina operante con R410a in funzione della località e del combustibile fossile sostituito con regime di tariffe elettriche con contatore dedicato

Situazione assai più favorevole si è ottenuta comparando le macchine aria-acqua: in tal caso le percentuali di riduzione dei costi da applicare alla pompa di calore R744 per ottenere indicatori economici comparabili con le analoghe macchine R410a sono più realizzabili rispetto alle pompe di calore polivalenti.

Le percentuali di abbattimento richieste nell'ipotesi di sostituire sistemi di generazione tradizionali alimentati a GPL sono dell'ordine del 5% per Roma, Napoli e Palermo nel caso di pompa di calore da 50 kW con tariffa elettrica per contatore dedicato (Figura 441). Tale percentuale per Milano nel caso di sostituzione di caldaia tradizionale a metano e uso di una tariffa elettrica progressiva, diventa del 35%.

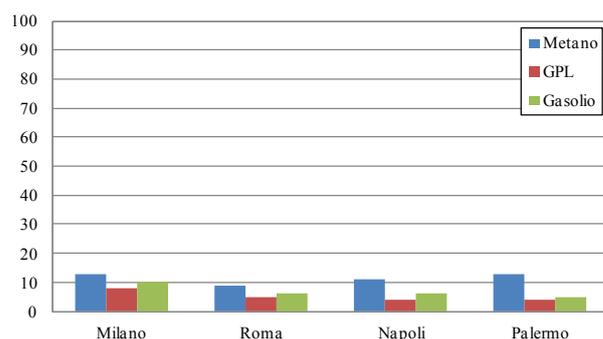


Figura 441. Percentuali di riduzione del costo iniziale da applicare alla pompa di calore R744 aria-acqua da 50 kW rispetto ad una equivalente macchina operante con R410a in funzione della località e del combustibile fossile sostituito con regime di tariffe elettriche con contatore dedicato

Gli indicatori economici mostrano che le soglie di costo delle macchine R744 e R410a sono influenzate dal sistema tariffario elettrico impiegato; in particolare le soglie diminuiscono usufruendo delle tariffe previste con un contatore dedicato. La differenza tra le due pompe di calore diminuisce in tutte le località per le fonti fossili considerate con l'aumentare della potenza della macchina. In tale contesto si può quindi ritenere che l'impiego di macchine polivalenti acqua-acqua R744 è più vantaggioso quanto più è elevata la quantità di energia termica e frigorifera richiesta per la climatizzazione dell'utenza.

Confronto sistemi di solar heating and cooling rispetto a soluzioni a pompa di calore

Sono stati successivamente messi a confronto i dati ottenuti dagli studi effettuati sugli impianti di solar heating and cooling con quelli ottenuti dall'analisi dei sistemi a pompa di calore, nelle differenti configurazioni analizzate. In Figura 442 è mostrato l'andamento del costo specifico tra impianti di SH&C con impianti a PDC con macchina a R744 polivalente, macchina a R410a polivalente, nonché delle stesse nella configurazione aria-acqua. È evidente come il costo del kW installato di SH&C è molto maggiore di quelli propri delle PDC. Ciò è dovuto ad una maggiore complessità d'impianto, ma soprattutto alla poca diffusione dei gruppi ad assorbimento che, per tale ragione, soffrono di costi ancora molto alti.

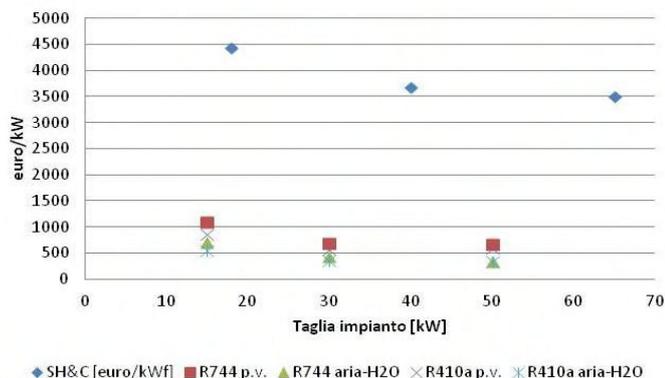


Figura 442. Confronto del costo specifico per differenti impianti a pompa di calore e SH&C

Tuttavia, mettendo a confronto il VAN al ventesimo anno di vita dell'impianto per la città di Roma (Figura 443) si nota come per impianti di piccole dimensioni la soluzione più conveniente risulta essere la pompa di calore a R410a nelle due configurazioni, polivalente e aria-acqua nonché la macchina a R744 nella configurazione aria-acqua, mentre il SH&C non conviene a causa degli alti costi di partenza.

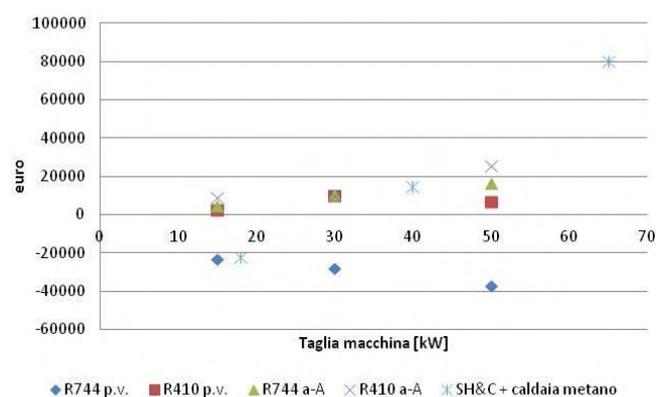


Figura 443. Confronto del costo specifico per differenti impianti a pompa di calore e SH&C per la città di Roma

Per potenze di 40-50 kW le performance economiche di impianti a pompa di calore e SH&C sono comparabili. Per taglie superiori iniziano a diventare nettamente convenienti gli impianti di SHC.

I valori del VAN riportati fanno riferimento a pompe di calore con fluido termovettore prodotto alla temperatura di 50 °C nel caso di caldaia tradizionale a gas metano di integrazione alla pompa di calore (stessa tipologia di caldaia considerata in integrazione all'impianto di solar heating and cooling).

Da notare tuttavia che i dati qui comparati sono stati ricavati da due studi effettuati separatamente e quindi affetti da alcune incertezze legate all'attività di simulazione dinamica avvenuta in contemporanea su due software di differente versione (TRNSYS 16.1 e TRNSYS 17). Risultano tuttavia valori certamente confrontabili e quindi accettabili.

a.5 Partecipazione all'Implementing Agreement IEA "Solar Heating and Cooling"

L'ENEA ha assicurato la partecipazione, quali rappresentanti italiani in ambito IEA, ai lavori dell'Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling", in particolare alle Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration" (attività nell'ambito della WGB-Numerical Modelling Session), Task 48 "Quality assurance and support measures for Solar Cooling" e Task 51 "Solar energy and urban planning", attualmente in fase di avvio.

ENEA è stata impegnata nell'organizzazione del 73rd IEA SH&C ExCo Meeting che si è tenuto a Roma a giugno 2013. E' stato inoltre organizzato un seminario, proprio in occasione della riunione dei Comitati Esecutivi dei Programmi della International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities Programme (EBC) e Solar Heating and Cooling Programme (SHC), che ha visto come obiettivo la presentazione dello stato dell'arte dello sviluppo di metodologie, tecnologie e strumenti dedicati al tema dell'efficienza energetica e l'integrazione di fonti rinnovabili negli edifici esistenti. Il seminario che si è tenuto presso la Sede Centrale dell'ENEA a Roma ha visto la partecipazione dei maggiori esperti del settore, in un contesto internazionale fortemente indirizzato verso gli edifici a consumo zero.

Task 42 "Compact thermal energy storage: material development and system integration" (attività nell'ambito della WGB-numerical modelling session)

La programmazione dei lavori della Task 42/24, iniziati nel febbraio del 2009 prevedevano una fine lavori per dicembre 2012. Al fine di completare tutti i lavori di ricerca e di validare sperimentalmente il corpus di algoritmi sviluppati, la IEA ha deliberato il prolungamento dei lavori della Task al 2015. La partecipazione del Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione, e Modelli matematici (DEIM) dell'Università Palermo, in collaborazione con ENEA, ha come obiettivo lo sviluppo di algoritmi e strumenti per migliorare le prestazioni di pannelli fotovoltaici mediante l'utilizzo di sistemi di accumulo termico.

Al fine di proseguire e migliorare la ricerca sui materiali a cambiamento di fase, il gruppo di ricerca del DEIM ha partecipato a diversi Expert Meeting della attività della Task 42, in ultimo al 9th Experts Meeting, tenutosi a Freiburg, Germany, ad aprile 2013 al Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Durante il meeting, in vista della proroga ottenuta, è stato analizzato lo stato di fatto dei lavori mettendo in evidenza gli obiettivi raggiunti e i punti di debolezza da indagare e approfondire nei prossimi anni. Tra gli obiettivi raggiunti rientra il lavoro del gruppo di ricerca del DEIM che ha messo a punto un algoritmo alle differenze finite capace di modellizzare il flusso termico dinamico attraverso una parete multistrato in presenza di cambiamento di fase, sia mediante metodo implicito che mediante metodo esplicito. La simulazione numerica è stata condotta mediante la creazione di un programma codificato con Visual Basic.NET. Inoltre al fine di validare i risultati ottenuti è stata messa a punto una test facility installata presso il tetto del DEIM.

La relazione scientifica del lavoro "Heat storage system coupled with a photovoltaic panel" è stata inserita nel rapporto ufficiale della IEA TASK 42 in fase di pubblicazione. Inoltre, durante gli anni della ricerca, il gruppo del DEIM ha prodotto altre pubblicazioni quali:

- *A finite difference model of a PV-PCM system*, Ciulla G., Lo Brano V., Cellura M., Franzitta V., Milone D., Energy Procedia 30 (2012) 198-206;
- *A numerical solution that determines the temperature field inside phase change materials: application in buildings*, Ciulla G., Lo Brano V., Messineo A., Peri G., in press: JCEM journal of Civil Engineering and Management, DOI: 10.3846/13923730.2013.778212.

Nel prosieguo delle attività previste in questa linea di ricerca ci si propone di verificare la correttezza dei risultati con alcune soluzioni analitiche largamente impiegate nella bibliografia di settore. Ci si propone infatti di approfondire l'applicazione del metodo di Crank-Nicolson all'algoritmo precedentemente identificato, per ottimizzare i vantaggi offerti dal metodo esplicito con quelli offerti dal metodo implicito nella risoluzione delle equazioni differenziali che descrivono il bilancio termico. Per tale ragione il gruppo di ricerca del DEIM prevede di partecipare ai prossimi incontri dei lavori della Task 42/24.

Task 48 " Quality assurance and support measures for solar cooling"

Il Dipartimento DEIM coordina le attività legate allo svolgimento di analisi del ciclo di vita di sistemi di solar cooling, recentemente unificate all'interno del task, nell'attività denominata "A2/B3 - Life cycle analysis at component and system level".

Il primo scopo è quello di svolgere secondo un formato condiviso dai partner alcuni Life Cycle Inventories (LCI) di componenti di impianti di solar heating/cooling allo scopo di integrare la casistica già sviluppata all'interno del Task 38. Supposto che la creazione di un vero e proprio data-base è un compito al di fuori della portata del Task, la raccolta consentirà in ogni caso, di ottenere informazioni di primaria importanza per lo svolgimento di analisi a livello di sistema. In secondo luogo verrà creato un tool di facile impiego per effettuare rapide analisi parametriche per valutare l'incidenza sull'impatto finale di alcuni fattori quali, ad esempio: l'affidabilità dei dati di input, il tasso di riciclo dei materiali, le prestazioni energetiche in fase d'uso di base e di altre rilevanti variabili.

Le attività del gruppo di lavoro del Dipartimento DEIM si sono articolate su più piani. Da una parte si è condotto il coordinamento del gruppo A2/B3, dall'altra di sono sviluppati ulteriori temi di ricerca di interesse della comunità mediante comunicazioni a seminari e congressi internazionali. Inoltre il gruppo di ricerca ha partecipato al 4th Expert Meeting che si tenuto ad Aprile 2013 a Newcastle (Australia) e all'Australian Solar Cooling 2013 Conference, Sydney.

Sono state presentate le seguenti relazioni:

- A new compact solar air conditioner based on fixed beds adsorption and high efficient evaporative cooling concepts and prototype
- New DEC open cycle for air conditioning based on fixed cooled adsorption beds and wet heat exchangers
- Advances in Solar DEC: test and researches at University of Palermo
- Life Cycle analysis on component/system.

In merito alle attività A2/B3 - Life cycle analysis at component and system level va registrata una difficoltà nella prosecuzione dei lavori dovuta al ridotto contributo degli altri partner. In ogni caso lo stato dei lavori è il seguente:

- I. la metodologia per la definizione della metodologia LCI è stata consolidata e condivisa fra i partner
- II. l'Inventario di nuovi componenti è in corso di redazione ma i soli contributor sono l'Università di Palermo e l'Austrian Institute of Technology (AIT)
- III. AIT ha dato la disponibilità a raccogliere dati per ulteriori analisi
- IV. l'Università di Palermo deve verificare se nei limiti di budget disponibili può realizzare ulteriori LCI rispetto a quelli pianificati all'inizio
- V. è necessario discutere dei parametri di impatto ambientale da utilizzare nel template del Tool per la verifica rapida di analisi di sensitività dei LCI.

Rispetto al workplan iniziale è da sottolineare che il contributo di esperti e industria è estremamente ridotto. Questo probabilmente implicherà una rimodulazione degli obiettivi in termini di numero di prodotti da inserire nel data base (act. A2). AIT si è impegnata a facilitare l'impiego di dati provenienti dal progetto europeo SolarCoolOpt Project. Tuttavia è necessario verificare se i metodi e gli output previsti in tale progetto siano coerenti con quelli condivisi in sede di Task 48 o al massimo compatibili. Ad esempio ci si aspetta come output "minimo" il calcolo del GER, GWP, payback energetici e di emissioni.

Attività di interesse comune all'interno del task 48

Nell'ambito dei sistemi di climatizzazione ad adsorbimento a ciclo aperto (Desiccant Evaporative Cooling) operanti con materiali adsorbenti allo stato solido, oggetto delle attività comuni del task, sono state svolte diverse attività di ricerca di sviluppo allo scopo di individuare soluzioni tecniche innovative che permettono lo smaltimento del calore prodotto durante il processo di adsorbimento. Diverse ricerche condotte sui sistemi di deumidificazione ad adsorbimento dimostrano infatti i vantaggi energetici ottenuti per mezzo di tale trasformazione termodinamica. Il sistema di deumidificazione più largamente impiegato nelle unità di trattamento aria Desiccant Evaporative Cooling (DEC) è il rotore essiccante costituito da una matrice cilindrica alveolare su cui sono posate le sostanze deumidificanti, siano esse assorbenti come il cloruro di litio, o adsorbenti come il gel di silice. In generale gli svantaggi dei rotori adsorbenti tradizionali possono essere riassunti nei seguenti punti:

- impossibilità di smaltire il calore di adsorbimento con conseguente diminuzione di efficienza dell'intero ciclo di trattamento dell'aria;
- prestazioni limitate in termini di deumidificazione massima ottenibile in presenza di aria di processo molto umida;

- il raggiungimento di elevate temperature nel materiale adsorbente durante la fase di deumidificazione comporta l'utilizzo di calore a temperatura maggiore per la rigenerazione;
- elevati costi di installazione.

Gli aspetti elencati possono essere considerati la motivazione alla base delle attività di ricerca svolte. In particolare, sulla base delle considerazioni viste, è stato sviluppato un componente innovativo per la deumidificazione e il contemporaneo raffreddamento dell'aria. Il componente proposto è costituito da uno scambiatore a pacco alettato impaccato con grani di gel di silice. Il trasferimento di calore avviene tra il flusso d'aria e un liquido refrigerante (normalmente acqua) mentre il trasferimento di massa coinvolge il flusso d'aria e lo strato di materiale adsorbente. In definitiva, il trasferimento di massa avviene dunque tra l'aria e il materiale adsorbente, sotto forma di scambio di umidità, mentre non c'è nessun trasferimento di massa tra l'aria e il fluido refrigerante. Il fenomeno descritto è rappresentato schematicamente in Figura 444.

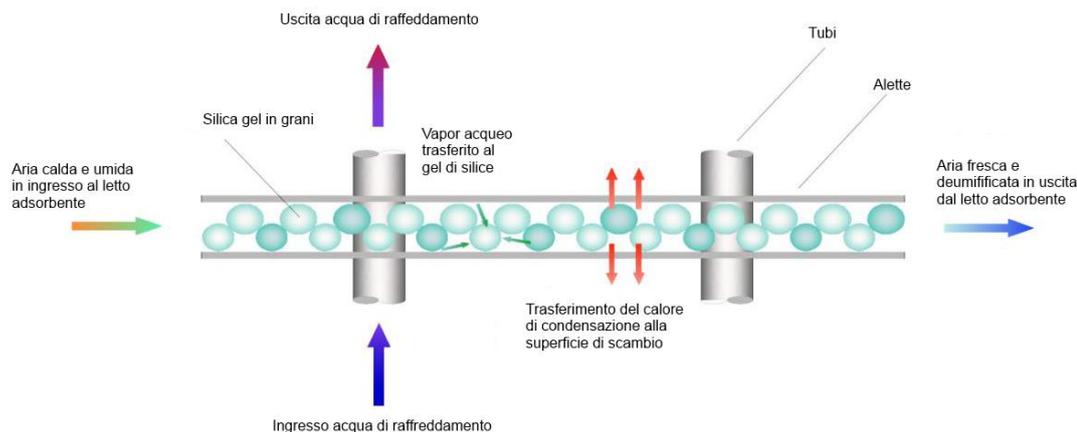


Figura 444. Schema trasferimento di calore e massa all'interno di uno scambiatore di calore con materiale adsorbente

Uno dei principali vantaggi di questo tipo di scambiatore è quello di poter avere facilmente ampie sezioni di passaggio e grandi superfici di scambio lato aria. Ciò permette da un lato di limitare le perdite di carico e dall'altro di raggiungere elevate potenze di scambio termico. Il grado di vuoto del letto dovrà essere scelto in modo tale da ottimizzare le perdite di carico, lo scambio di massa e di calore. Per ciò che riguarda i materiali adsorbenti che possono essere utilizzati esiste un'ampia varietà di materiali disponibili sul mercato e di altri ancora in fase di ricerca. In particolare, al momento i materiali più appropriati per l'applicazione specifica sono il gel di silice e i composti da esso derivati quando questo viene impregnato con cloruro di calcio. Il gel di silice è infatti tra i materiali adsorbenti che richiedono le più basse temperature di rigenerazione, e che presentano un calore di adsorbimento modesto. Esistono inoltre vari prodotti disponibili sul mercato a costi contenuti. Al fine di testare la soluzione proposta sono stati messi a punto un banco di prova per uno scambiatore contenente 18 kg di gel di silice e con portata massima di 300 m³/h, progettato per applicazioni in sistemi DEC in ambito residenziale.

I risultati ottenuti sono stati significativi e dimostrano l'efficacia della soluzione proposta. In particolare possono essere evidenziati i seguenti aspetti:

- prestazioni molto elevate in termini di deumidificazione massima raggiungibile;
- possibilità di raffreddare il flusso d'aria fino a temperature inferiori a quelle dell'aria in ingresso;
- possibilità di sfruttare il componente anche come accumulo energetico. Il calore fornito ad esempio da un impianto solare può essere accumulato sotto forma di capacità di adsorbimento nel materiale adsorbente, realizzando una sorta di accumulo a cambiamento di fase.

I risultati ottenuti sono stati utilizzati per progettare un sistema DEC innovativo basato sull'utilizzo di due letti adsorbenti fissi. L'impianto sarà a servizio del Laboratorio Solare del Dipartimento DEIM dell'Università di Palermo e avrà il compito di attuare un trattamento dell'aria completo ovvero potrà essere utilizzato per la climatizzazione sia estiva che invernale del locale citato. Inoltre, dato l'elevato affollamento del locale, l'impianto provvederà alle esigenze di ventilazione con un adeguato ricambio dell'aria.

Il calore per la rigenerazione del materiale adsorbente sarà fornito da una pensilina ibrida PV/th che coprirà anche il fabbisogno di elettricità dell'impianto su base annuale. Il raffreddamento dei letti adsorbenti sarà realizzato per mezzo di un circuito ad acqua collegato ad una torre evaporativa. Inoltre, nel sistema è stato implementato un sistema di raffreddamento evaporativo indiretto realizzato tramite due scambiatori di calore evaporativi a flusso incrociato posti in serie secondo quanto riportato in Figura 445.

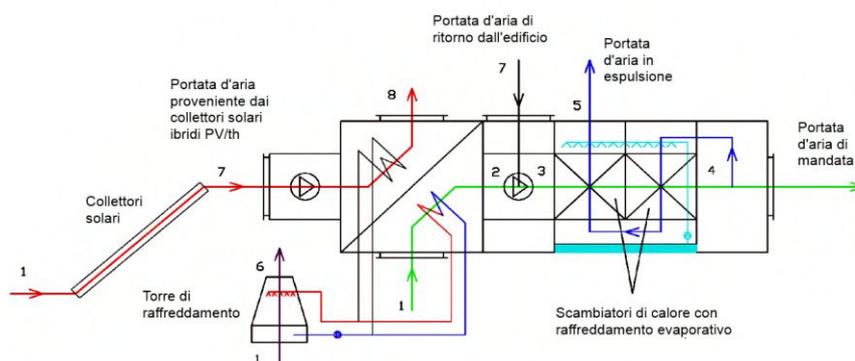


Figura 445. Sistema DEC innovativo basato sui letti adsorbenti fissi

Parallelamente all'applicazione citata, si sta lavorando allo sviluppo di un sistema DEC di piccola taglia per applicazioni nel settore residenziale e commerciale cosiddetto leggero. Si tratta di un sistema compatto che integra tutti i componenti all'interno avente una superficie solare di circa 2 m². La portata è di 500 m³/h e la potenza frigorifera di circa 3 kW. Al momento è già stata completata la fase di realizzazione del prototipo e si stanno raccogliendo i dati di monitoraggio.

Task 51 "Solar energy and urban planning"

A maggio 2013, la International Energy Agency, nell'ambito del programma Solar Heating and Cooling (SHC), ha lanciato un nuovo gruppo di ricerca, denominato Task 51 "Solar Energy in Urban Planning", operativo fino all'aprile del 2017 (www.task51.iea.shc.org). La sua finalità include lo studio di tematiche legate all'impiego delle tecnologie solare, in particolare in riferimento a:

- sviluppo di nuove aree urbane;
- sviluppo di aree urbane esistenti;
- paesaggi sensibili o protetti (campi solari).

In tutti e tre i campi appena menzionati, si farà riferimento sia al solare fotovoltaico sia al solare termico. Il lavoro è stato strutturato in quattro principali temi, analizzati in diversi sottogruppi di ricerca: subtasks A. *Quadro di riferimento normativo, barriere ed opportunità per l'impiego dell'energia solare*; B. *Sviluppo di processi, metodi e strumenti*; C. *Casi studio e ricerche attive (problematiche legate all'implementazione, metodi/strumenti/processi sperimentali, dimostratori (ad esempio Net ZEB, Net ZEC))*; D. *Educazione e disseminazione*.

Il principale contributo fornito dall'ENEA si colloca sull'argomento 3 (Sensitive/protected landscapes - Solar fields), in relazione alle attività del Subtask B e C.

Le principali attività del Subtask B "*Processes, methods and tools*" sono: individuare tra processi e strumenti di supporto esistenti (conoscenza, metodi, strumenti) quei fattori che consentono processi decisionali per l'impiego dell'energia solare nella pianificazione urbana, e rendere chiari quali siano gli elementi di sviluppo; sviluppare nuovi processi di pianificazione urbana o migliorare quelli esistenti, per facilitare l'impiego di strategie solari passive ed attive nelle strutture urbane, nel caso del nuovo, del preesistente e in paesaggi sensibili o protetti; sviluppare nuovi strumenti di supporto/migliorare quelli esistenti (conoscenza, metodi, strumenti) e mostrare come linee guida che riguardino l'impiego di tecnologie solari attive e passive possano essere integrate in nuovi o esistenti strumenti di supporto, individuando anche la adeguata fase del processo di pianificazione in cui il solare vada inserito.

Le principali attività del Subtask C "*Case studies and action research*" (la cui principale finalità è quella di favorire la replicabilità di pratiche di successo) sono: coordinare un archivio di casi studio, buone pratiche e casi di successo, trasversalmente ai vari argomenti trattati nel subtask; lanciare e gestire azioni di ricerca in ciascuno dei paesi partecipanti; facilitare e documentare lo sviluppo e la sperimentazione di strumenti di supporto e modelli processuali almeno in una città in ciascuno dei paesi partecipanti, coordinando questa azione con i decisori locali.

La partecipazione dell'ENEA al Task 51 segue al lavoro svolto in altri contesti di ricerca nei quali è stata attiva negli scorsi anni, oltre che l'esperienza maturata grazie all'organizzazione di eventi scientifici e conferenze tematiche. In particolare, l'ENEA ha partecipato dal 2008 al 2012 alla ricerca condotta in seno al gruppo IEA SH&C Task 41 "Solar Energy and Architecture" (www.task41.iea.shc.org), e partecipa (fino all'Ottobre 2013) IEA SHC-EBC Task 40 "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" (www.task40.iea.shc.org). Inoltre, dal 2011, è responsabile per

l'organizzazione scientifica di un evento speciale della European Photovoltaic Solar Energy Conference, denominato Photovoltaics | Forms | Landscapes, che affronta l'argomento del design del fotovoltaico alla scala del paesaggio (www.pv-landscapes.com).

Tra l'ottobre del 2012 e il settembre 2013, lo sviluppo della tematica da indagare nell'ambito del Task 51 ha richiesto la partecipazione ad un incontro preliminare presso l'EPFL di Losanna (Svizzera, aprile 2013), e la partecipazione al kick off meeting del Task, tenutosi presso Stoccarda (Germania) nel maggio 2013. Il primo Experts Meeting, si è tenuto a Friburgo (Germania) dal 23 al 25 settembre.

Le attività ENEA previste nell'ambito del Task sono state presentate a Roma, presso la sede ENEA, in occasione del workshop *Riqualificazione degli edifici esistenti con elevati standard energetici* (12 giugno 2013).

b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura

L'attività prevede l'analisi sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura e la messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari.

b.1 Attività di ricerca, sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura, in particolare nei settori industriale, commerciale e terziario

Scopo della presente task è la sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura (100-300 °C), da destinarsi alla climatizzazione degli ambienti, alla produzione di calore di processo e alla produzione di freddo in ambito industriale, commerciale e terziario.

Modellazione ottica e termo-fluidodinamica applicata alle diverse tipologie di concentratori esaminate, per analizzarne le prestazioni energetiche nel breve e lungo periodo

La modellazione ottica e termo-fluidodinamica è stata sviluppata per concentratori parabolici lineari e per concentratori a specchi lineari di Fresnel, considerando sia ricevitori evacuati sia ricevitori in cui non è praticato il vuoto.

L'analisi ottica è stata effettuata utilizzando tecniche di ray-tracing che, a partire dai dati di radianza sulla parabola e sugli specchi di Fresnel, ha permesso di calcolare la distribuzione di radiazione concentrata sulla superficie esterna del tubo ricevitore al cui interno scorre il fluido termo-vettore (in particolare olio diatermico), per il quale si è calcolato mediante un opportuno script di MATLAB il coefficiente di scambio termico con la parete interna del tubo ricevitore. Le Figure 446 e 447 mostrano in sezione le geometrie dei due sistemi ottici considerati.



Figura 446. Immagine 3D del concentratore parabolico lineare e dettaglio del ricevitore in sezione

Il primo è costituito da un riflettore primario costituito da una superficie parabolica lineare sul cui fondo è praticato un taglio in corrispondenza del tubo ricevitore, costituito da un tubo in acciaio, rivestito con una vernice con determinate caratteristiche ottiche, a sua volta incapsulato in un tubo di vetro all'interno del quale è presente aria a pressione atmosferica.



Figura 447. Immagine 3D del concentratore a specchi lineari di Fresnel e dettaglio del ricevitore in sezione

Il secondo sistema è costituito invece da 6 specchi a sezione cilindrica, movimentati da un sistema di attuatori che ruotano gli specchi in maniera da concentrare la radiazione solare su un ricevitore costituito dallo stesso tubo non evacuato descritto in precedenza, sulla cui sommità è posizionato un riflettore secondario del tipo a CPC (Compound Parabolic Concentrator) racchiuso in una opportuna cassa metallica nella cui intercapedine è presente aria.

Per ciascuna tipologia di concentratore descritta sopra, è stata determinata la potenza radiante assorbita dal tubo ricevitore per unità di lunghezza in corrispondenza di un flusso solare di 1000 W/m^2 con raggi diretti parallelamente all'asse ottico del concentratore e caratterizzati da una divergenza angolare che tiene conto delle caratteristiche geometriche ed dalle proprietà ottiche dei vari componenti del sistema di concentrazione. Essendo tali elementi non ideali, nelle elaborazioni ottiche sono stati tenuti in considerazione gli effetti dovuti:

- alle imperfezioni costruttive e meccaniche degli specchi primari e dell'eventuale ottica secondaria (deviazioni dalla forma ideale delle superfici riflettenti);
- agli errori di fissaggio meccanico e di posizionamento dei vari componenti del sistema di concentrazione (deformazioni della struttura);
- agli errori di riflessione speculare;
- alla precisione del sistema di inseguimento (errori di tracking).

I grafici seguenti (Figure 448-451) mostrano alcuni esempi di risultati delle analisi ottiche effettuate sulle due tipologie di concentratori. Le immagini illustrano, rispettivamente, la distribuzione della radiazione solare concentrata su una sezione del tubo ricevitore e la distribuzione angolare del flusso radiativo assorbito dal tubo ricevitore per unità di lunghezza.

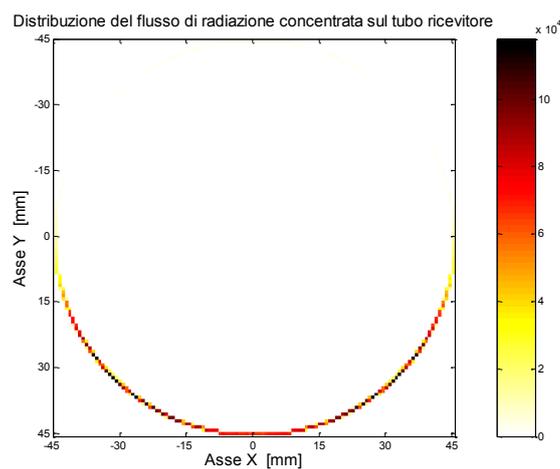


Figura 448. Caso concentratore parabolico lineare: distribuzione della radiazione solare concentrata lungo la circonferenza del tubo ricevitore (valori espressi in W/m^2)

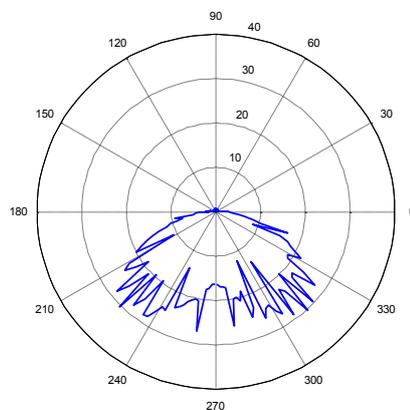


Figura 449. Caso concentratore parabolico lineare: distribuzione angolare del flusso radiativo assorbito dal tubo ricevitore per unità di lunghezza (valori espressi in W/m)

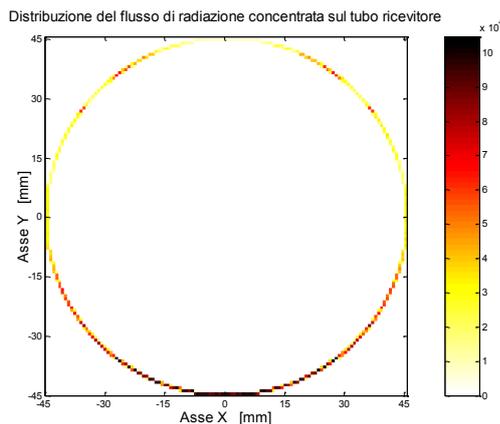


Figura 450. Caso concentratore Fresnel: Distribuzione della radiazione solare concentrata lungo la circonferenza del tubo ricevitore (valori espressi in W/m^2)

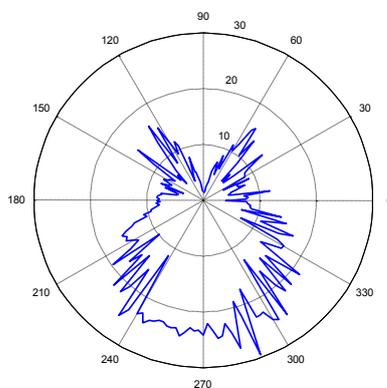


Figura 451. Caso concentratore Fresnel: distribuzione angolare del flusso radiativo assorbito dal tubo ricevitore per unità di lunghezza (valori espressi in W/m)

Le analisi ottiche di cui sopra si riferiscono al caso di un fascio di raggi solari caratterizzato da una divergenza angolare di 5 mrad, corrispondente ad una particolare scelta degli errori da attribuire alle imperfezioni del sistema ottico.

Poiché l'efficienza ottica dipende dalla divergenza angolare dei raggi solari, è stata condotta un'analisi di sensibilità sulle due tipologie di concentratori che ha evidenziato, a parità di dimensioni del ricevitore, una maggiore criticità nella progettazione del sistema ottico per i sistemi Fresnel rispetto a quelli parabolici lineari, come si evince dalla Figura 452.

Per effettuare la caratterizzazione termica dei concentratori considerati, i parametri di cui sopra sono stati utilizzati come dati di input per un modello agli elementi finiti sviluppato in ambiente Comsol - MultiPhysics. Tale modello partendo da una geometria bidimensionale risolve le equazioni di Fourier per quanto riguarda il flusso termico nei solidi, l'equazione di bilancio energetico e le equazioni di Navier Stokes per i fluidi. I modelli sviluppati tengono conto degli scambi termici radiativi, considerando le superfici interessate come corpi grigi caratterizzati da valori di emissività dipendenti dalla temperatura.

L'analisi termica è stata condotta considerando note la temperatura e la portata dell'olio diatermico all'interno del tubo ricevitore, nonché la distribuzione del flusso radiativo assorbito dal tubo ricevitore. Lo scambio termico tra tubo in acciaio e fluido, alle condizioni fluidodinamiche considerate, è di tipo turbolento ed è stato modellizzato introducendo un coefficiente di

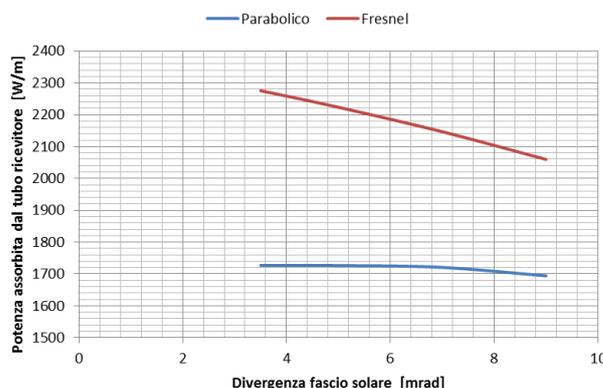


Figura 452. Analisi di sensibilità delle due tipologie di concentratori

scambio termico funzione dei numeri di Reynolds e Prantl e del coefficiente di attrito di Darcy, i cui valori sono stati calcolati mediante un apposito script sviluppato in ambiente MATLAB. Infine, per quanto riguarda lo scambio termico convettivo tra parte esterna in vetro e aria ambiente, si è considerato un coefficiente di scambio corrispondente ad una velocità del vento di 2,5 m/s.

Il software utilizzato ha fornito in output il campo di temperatura nei vari domini e ha permesso di calcolare i relativi flussi termici. In particolare integrando il flusso termico per convezione tra parete interna del tubo in acciaio e olio diatermico si è ottenuta la potenza termica utile ceduta al fluido termo-vettore per unità di lunghezza del tubo ricevitore che è funzione della temperatura in ingresso dell'olio diatermico per date condizioni al contorno. Con lo stesso procedimento sono state calcolate le perdite termiche compressive del tubo ricevitore.

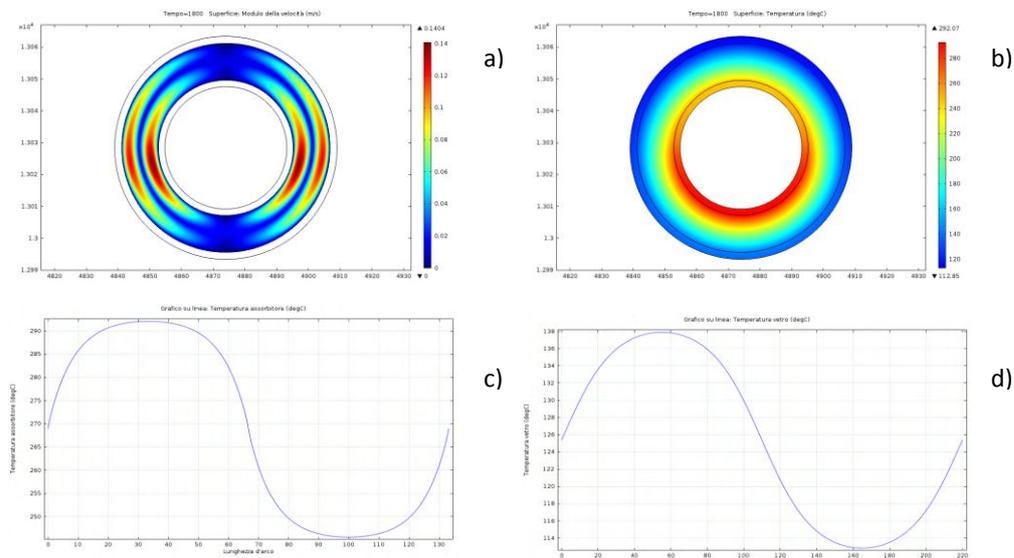


Figura 453. Analisi termofluidodinamica sul concentratore parabolico lineare

Le Figure 453 e 454 mostrano alcuni esempi di risultati delle analisi termo-fluidodinamiche effettuate sulle due tipologie di concentratori. Tali immagini illustrano il campo delle velocità dell'aria nell'intercapedine (Figura 453a) e il campo di temperatura sull'intera sezione del ricevitore (Figura 453b). Inoltre sono riportati anche i grafici che mostrano gli andamenti delle temperature sulle superfici esterne sia del tubo ricevitore che del vetro di copertura (Figure 453c e 453d).

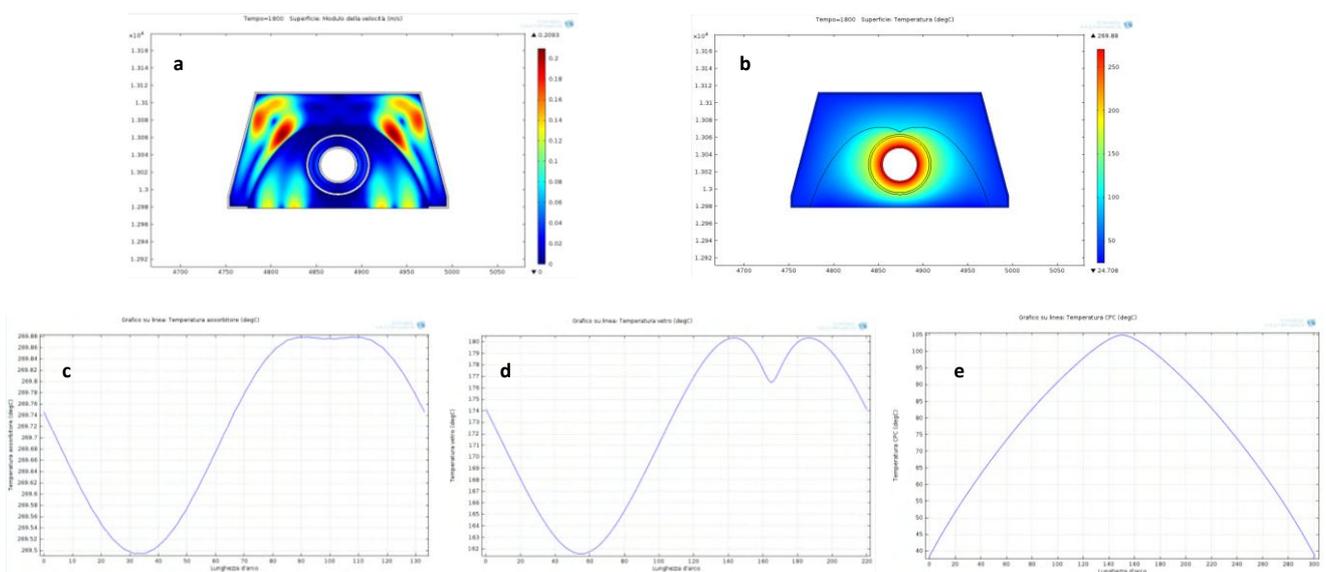


Figura 454. Analisi termofluidodinamica sul concentratore a specchi lineari di Fresnel

Nel caso Fresnel oltre alle immagini e grafici di cui sopra (Figure 454), si riporta anche l'andamento delle temperature lungo la parete del concentratore secondario a CPC (Figura 454e).

Integrando il flusso termico convettivo sulla linea che delimita la superficie interna del tubo è stato calcolato il flusso termico ceduto al fluido termo-vettore per unità di lunghezza del tubo ricevitore. Tale parametro, fissate le condizioni iniziali e quelle al contorno, è stato calcolato per diverse temperature in ingresso al tratto di tubo considerato e i dati ottenuti sono stati fittati con il metodo dei minimi quadrati ottenendo una curva che esprime l'andamento del flusso termico in funzione della temperatura dell'olio diatermico

Poiché le perdite termiche in sistemi solari a concentrazione sono fortemente dipendenti dalle proprietà ottiche delle superfici radianti, è stata condotta un'analisi di sensibilità con diversi valori di emissività del trattamento superficiale del tubo ricevitore.

I grafici nelle figure 455 e 456 mostrano, per entrambe le tipologie di concentratori, gli andamenti sia della potenza ceduta al fluido termo-vettore sia delle perdite termiche complessive verso l'ambiente.

Mediante un apposito script sviluppato in ambiente MATLAB, che utilizza le curve di cui sopra, si è calcolato l'incremento di temperatura lungo il tubo ricevitore e il relativo flusso termico per una lunghezza prefissata pari alla lunghezza complessiva del concentratore considerato. In particolare si è diviso il tubo ricevitore in tratti di lunghezza unitaria; nota la temperatura di ingresso al primo tratto lo script calcola il flusso termico mediante la funzione ottenuta con la modellazione agli elementi finiti di cui sopra; noto quest'ultimo e fissata la portata è stato possibile calcolare la temperatura in uscita dal primo tratto che è stata assunta come temperatura in ingresso al secondo tratto. Ripetendo il calcolo per tutti i tratti che compongono il ricevitore è stato possibile ottenere il flusso termico complessivo ricevuto dal fluido termo-vettore e la distribuzione di temperatura lungo il tubo. Il calcolo è stato ripetuto per diverse temperature di ingresso al ricevitore in modo da determinare la curva di efficienza, le temperature e i flussi termici di interesse relativi a ciascun concentratore considerato.

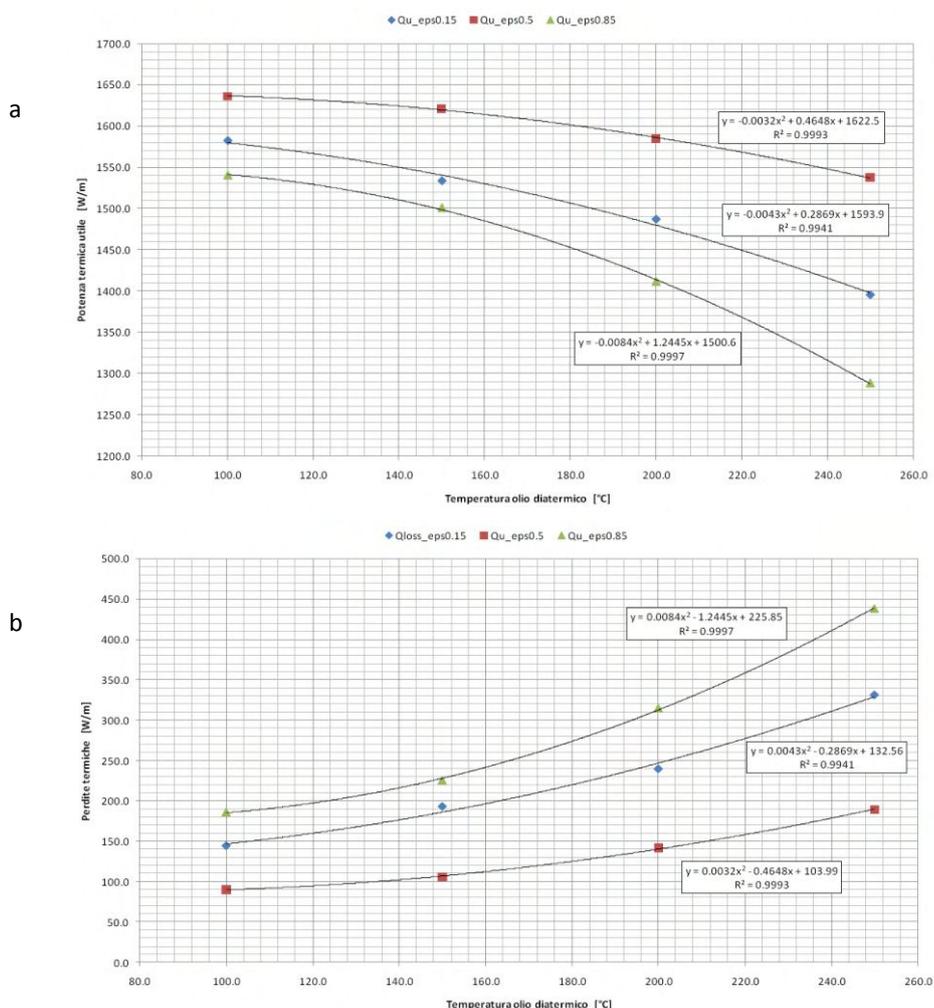


Figura 455. Concentratore parabolico lineare: potenza ceduta al fluido termo-vettore (a); perdite termiche complessive verso l'ambiente (b)

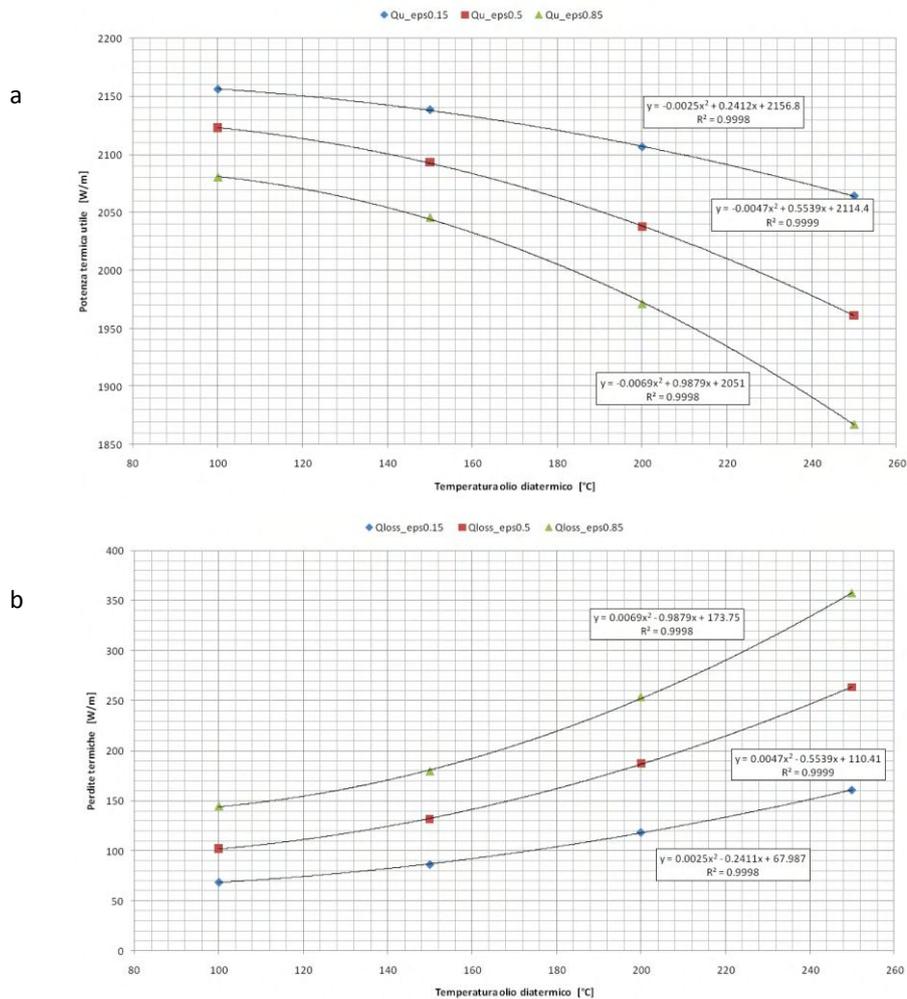


Figura 456. Concentratore a specchi lineari di Fresnel: potenza ceduta al fluido termo-vettore (a); perdite termiche complessive verso l'ambiente (b)

Sperimentazione in campo delle diverse tipologie di concentratori considerate al fine di confrontare e validare i modelli sviluppati

Lo scopo essenziale dell'attività di modellazione descritta nel paragrafo precedente è stato quello di mettere a punto uno strumento di calcolo delle grandezze energetiche di interesse per la caratterizzazione termica dei concentratori presi in esame, che tenga conto in maniera dettagliata ed accurata del maggior numero possibile di variabili che caratterizzano il loro funzionamento. E' chiaro che risulta altrettanto necessaria una serie di campagne sperimentali con lo scopo di validare lo strumento matematico messo a punto. La sperimentazione infatti può essere utile nell'individuare eventuali punti deboli del modello e indicare le eventuali correzioni. Pertanto sono state condotte campagne sperimentali su prototipi di concentratori parabolici lineari e a specchi lineari di Fresnel dalle caratteristiche simili a quelle considerate nelle analisi teoriche di cui sopra.

Le immagini nelle Figure 457 e 458 illustrano i setup sperimentali allestiti nel corso della presente annualità dell'accordo di programma, che hanno permesso di caratterizzare dal punto di vista energetico le due diverse tecnologie solari a concentrazione oggetto del presente rapporto.

Per essi è stata determinata la curva di efficienza con il metodo stazionario descritto nella norma UNI_EN 12975 utilizzando il circuito ad olio diatermico (realizzato e messo a punto nelle precedenti annualità dell'accordo di programma) che ha permesso la caratterizzazione dei componenti nel range 100-300°C. Le curve di efficienza ottenute sperimentalmente sono state confrontate con quelle calcolate mediante i modelli ottici e termici sviluppati nella fase precedente delle attività.



Figura 457. Collettore parabolico lineare in fase di sperimentazione



Figura 458. Collettore a specchi lineari di Fresnel in fase di sperimentazione

In particolare la Figura 459 mostra l'andamento delle curve di efficienza in stato stazionario ottenute, mediante i modelli teorici ottici e termo fluido-dinamici, relativi al concentratore parabolico lineare. Tali curve si riferiscono a diversi valori dell'emissività caratteristici della vernice utilizzata per la realizzazione del coating superficiale del tubo ricevitore. A tali curve sono state sovrapposti i dati sperimentali ottenuti nella campagna di misure.

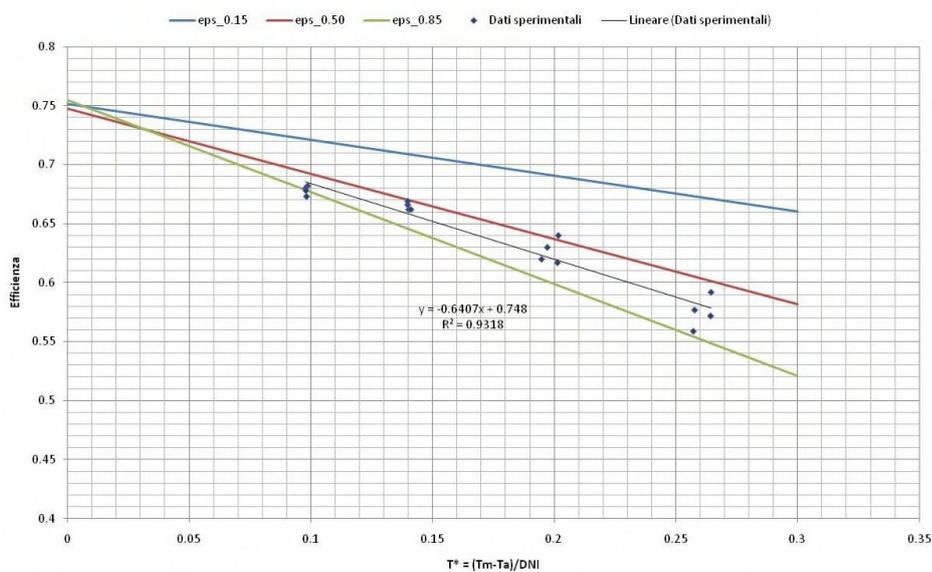


Figura 459. Confronto tra curve di efficienza in stato stazionario ottenute con i modelli teorici e risultati sperimentali per il sistema parabolico lineare

Analogamente al grafico precedente, la Figura 460 mostra l'andamento delle curve di efficienza ottenute per il sistema a specchi lineari di Fresnel. In questo caso il confronto tra dati sperimentali e curve teoriche (ottenute per incidenza normale della DNI, ossia con sole allo zenit) è più complesso dato che alle nostre latitudini il sole non raggiunge mai la condizione desiderata, per cui il dato misurato è sempre affetto da effetti connessi all'incidenza trasversale della radiazione solare (effetti di IAM – Incidence Angle Modifier) che riducono il valore di efficienza termica misurata. In verde sono riportati i dati sperimentali corretti per tener conto di tale circostanza.

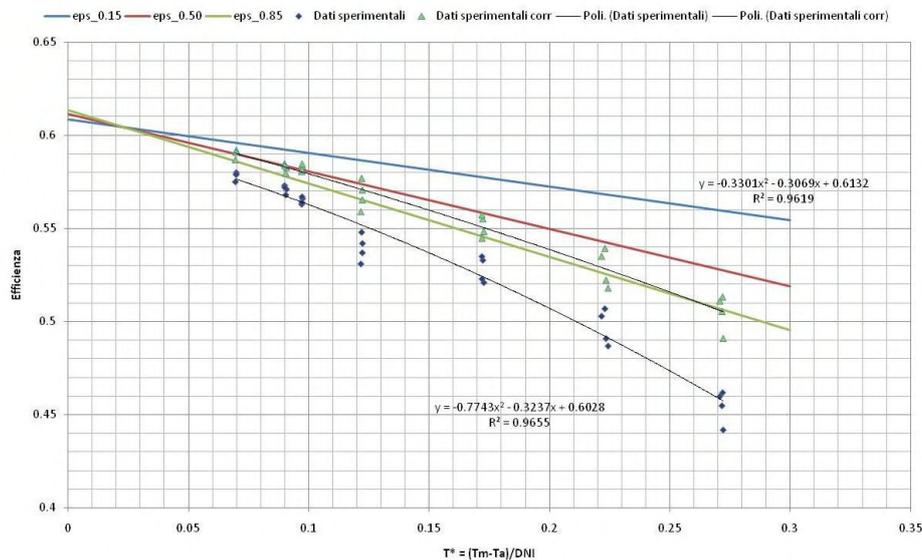


Figura 460. Confronto tra curve di efficienza in stato stazionario ottenute con i modelli teorici e risultati sperimentali per il sistema a specchi lineari di Fresnel

Studio di ricevitori a mini e micro-canali da utilizzarsi in applicazioni solari a media temperatura caratterizzate da temperature di lavoro comprese tra 150 e 200°C

In continuità con le attività condotte nella passata annualità dell'accordo di programma, sono state portate avanti attività di studio orientate all'ottimizzazione di componenti solari a media temperatura basati su ottiche del tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*). Tali attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, che si è fatto carico delle attività di seguito descritte.

In particolare è stato effettuato uno studio teorico-sperimentale su dispositivi di scambio termico da utilizzare come ricevitori in collettori solari a CPC, che si è articolato nelle seguenti fasi:

- Analisi teorica e sperimentazione su ricevitori a mini/microcanali;
- Analisi delle modalità di asporto termico del flusso radiante attraverso l'utilizzo di fluidi in fase liquida, valutando nel contempo la possibilità di utilizzare fluidi in cambiamento di fase per migliorare l'asporto del calore prodotto dalla radiazione concentrata.

Gli esiti di tale studio costituiscono le basi per l'ottimizzazione delle performance di tali tipologie di concentratori, in vista di un loro utilizzo in applicazioni a media temperatura quali ad esempio la climatizzazione solare.

b.2 Elaborazione di studi per valutare le potenzialità di applicazione di sistemi co- e tri-generativi di piccola taglia che utilizzano mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico (ORC), oppure di sistemi ibridi quali quelli del tipo Dish/Stirling o quelli basati su tecnologie termo-fotovoltaiche a concentrazione (CTPV)

Scopo della presente attività è l'elaborazione di uno studio per valutare le potenzialità di applicazione di sistemi co- e tri-generativi di piccola taglia che utilizzino mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico (ORC), oppure di sistemi ibridi quali quelli del tipo Dish/Stirling o quelli basati su tecnologie termo-fotovoltaiche a concentrazione (CPVT).

In particolare nello studio elaborato, per ciascuno dei sistemi per la produzione combinata di energia presi in considerazione, è stata fornita:

1. Una descrizione dello stato dell'arte delle tecnologie disponibili, sia dal punto di vista dei sistemi solari a concentrazione utilizzabili sia dal punto di vista dei sistemi attualmente disponibili sul mercato per la conversione dell'energia solare in elettricità, calore e/o freddo.
2. Una descrizione sintetica dei principi di funzionamento, delle principali caratteristiche dei componenti e delle relative prestazioni energetiche. Inoltre vengono fornite informazioni relative alle possibili applicazioni e al potenziale di diffusione, evidenziando sia i vantaggi che i limiti tecnologici che tali sistemi hanno in relazione soprattutto all'accoppiamento con sistemi ad energia solare.

Dallo studio condotto emerge come l'abbinamento delle tecnologie solari a concentrazione a sistemi di produzione combinata di energia in assetto co-generativo e tri-generativo non hanno raggiunto ancora la piena maturità tecnologica, tale da poter essere considerata una tecnologia di ampia diffusione commerciale. Infatti, gran parte delle applicazioni esistenti sono ancora allo stadio di prototipo ed solo in alcuni casi allo stadio pre-industriale. Ciò ha reso particolarmente difficoltoso il reperimento di informazioni attendibili sulle prestazioni energetiche delle tecnologie considerate, i cui valori sono necessari per l'elaborazione di un studio tecnico-economico in grado di valutare in maniera affidabile le potenzialità di tali tecnologie.

Pertanto, ad eccezione dei sistemi da abbinare a cicli ORC (per i quali non è stato possibile effettuare sperimentazioni in campo), per ciascuna delle restanti tecnologie esaminate sono state condotte campagne sperimentali che hanno permesso di monitorare, in diverse condizioni operative, le prestazioni energetiche su medio-lungo periodo. I risultati di tali sperimentazioni hanno consentito di caratterizzare energeticamente le diverse tecnologie e di valutare le rispettive produzioni energetiche su base annuale, a partire dalle quali è stato possibile effettuare un primo confronto sulle potenzialità di applicazione.

Parte delle attività descritte nel presente paragrafo sono state condotte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, che ha curato la parte relativa all'analisi delle potenzialità dei sistemi ibridi termo-fotovoltaici a concentrazione.

Mini e micro CSP abbinati a cicli a fluido organico

Relativamente ai sistemi CSP accoppiabili a cicli ORC, le tecnologie solari a concentrazione che più si prestano a tale applicazione sono state divise in due macro categorie:

- tecnologie solari a concentrazione ad alta temperatura;
- tecnologie solari a concentrazione a media temperatura.

Nello studio effettuato sono state considerate le sole tecnologie solari a concentrazione a media temperatura in quanto queste sono in grado di produrre energia termica a valori di temperatura compatibili con quelle richieste degli impianti ORC presi in considerazione.

Gli impianti a fluido organico esaminati sono quelli che utilizzano temperature comprese tra 100 e 150°C fino ad arrivare a circa 270 °C; questi prevedono l'utilizzo esclusivo di cicli cosiddetti "binari" nei quali la sorgente termica scambia calore con un fluido termo-vettore ad alto punto di ebollizione (olio diatermico); sarà tale fluido termo-vettore poi a scambiare (negli scambiatori di calore evaporativi) il calore con il fluido di lavoro organico.

In Figura 461 è riportato un classico ciclo ORC binario che utilizza come fluido termo-vettore l'olio diatermico proveniente da una fonte termica quale potrebbe essere un impianto solare a concentrazione, una caldaia a biomassa, calore proveniente da fonte geotermica, ecc.

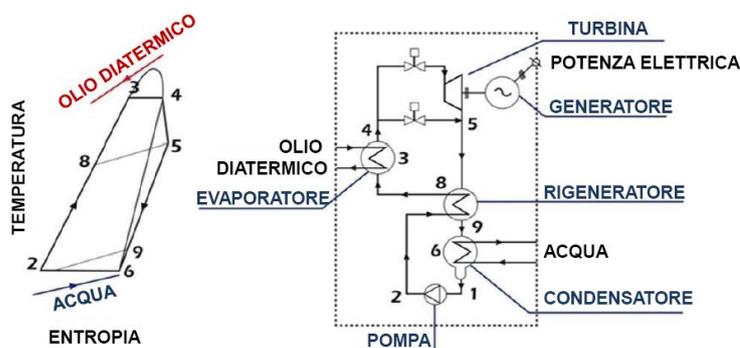


Figura 461. Schema di funzionamento di un ciclo ORC e il relativo diagramma termodinamico

Lo studio analizza i diversi aspetti connessi alla scelta del fluido organico più idoneo alle applicazioni per bassa e media temperatura relative ai cicli ORC. La Figura 462 illustra le taglie di impianto disponibili in relazione alla temperatura di lavoro considerata e alla macchina motrice utilizzata nel ciclo ORC.



Figura 462. Tecnologie impiantistiche applicabili in funzione della temperatura disponibile e della produzione di energia elettrica

Nello rapporto RdS/2013/093 è stato riportato un elenco sia dei maggiori produttori di impianti a ciclo ORC presenti sul mercato sia di produttori di sole turbine le cui caratteristiche sono tali da poter essere facilmente abbinate a cicli a fluido organico, con particolare riferimento alle micro- e mini-turbine ed agli espansori volumetrici rotativi di tipo Scroll.

Infine è stata condotta un'analisi delle prestazioni dei sistemi CSP accoppiati a cicli ORC prendendo in considerazione le due tecnologie solari a concentrazione già esaminate nei precedenti paragrafi, ossia: i sistemi a concentrazione parabolici lineari e i sistemi a concentrazione a specchi lineari di Fresnel. Per ciascuna di queste tecnologie solari è stata condotta un'analisi energetica che ha permesso di valutare, mediante l'utilizzo del software F-Chart, la produzione di calore alle temperature richieste dai diversi cicli ORC abbinabili.

Partendo quindi dai valori di efficienza media annuale del campo solare e conoscendo i valori di efficienza elettrica e termica caratteristici dei cicli considerati è stato possibile stimare la produzione energetica in assetto co-generativo di tali sistemi a partire dalla disponibilità di radiazione solare diretta (DNI) tipica di alcuni siti presi a riferimento per l'analisi.

Sistemi Dish/Stirling

Per questa tipologia di sistemi ibridi per la produzione combinata di elettricità e calore, oltre ad una breve analisi dello stato dell'arte e alla descrizione delle principali caratteristiche funzionali di tali sistemi, è stato possibile effettuare un'analisi delle prestazioni annuali a partire da dati relativi al monitoraggio su breve e lungo periodo di un sistema Dish/Stirling installato presso il laboratorio solare del C.R. ENEA Trisaia.

L'analisi delle prestazioni energetiche del sistema è stata condotta monitorando giornalmente la produzione elettrica e termica del collettore in diverse condizioni operative, sia dal punto di vista meteo-climatico (diversi valori della DNI giornaliera registrata nel periodo di monitoraggio) sia dal punto di vista termico (diversi valori della temperatura media giornaliera del fluido di raffreddamento in ingresso al motore Stirling).

La Figura 463 mostra la foto del sistema in prova ed il lay-out di impianto nella configurazione utilizzata per le prove. In particolare l'utenza termica è stata simulata attraverso una batteria di scambiatori aria/acqua di potenza equivalente alla potenza termica nominale del motore Stirling. Ciò ha consentito di determinare l'output energetico massimo ottenibile dalla macchina.

I valori di produzione energetica, ottenuti su base giornaliera durante il periodo di sperimentazione, sono stati correlati ai corrispondenti valori di DNI giornaliera registrati nelle ore di funzionamento del sistema, ottenendo dei coefficienti che hanno permesso di caratterizzare

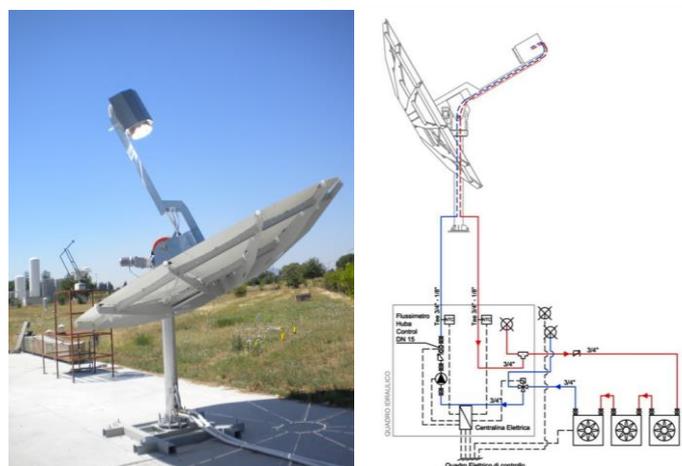


Figura 463. Sistema in prova e lay-out dell'impianto utilizzato per le prove

univocamente il sistema in prova. La figura 464 riporta i dati sperimentali e le curve di regressione relative alle prestazioni energetiche giornaliere del sistema.

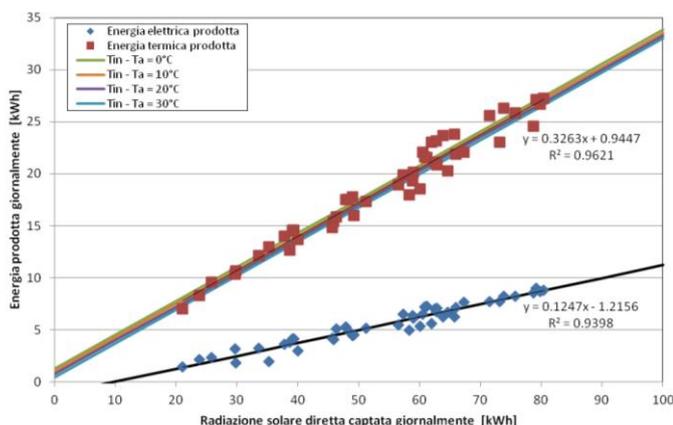


Figura 464. Dati sperimentali e curve di regressione relative alle prestazioni energetiche giornaliere del sistema sistema Dish/Stirling

La conoscenza del comportamento giornaliero del sistema ha consentito infine di caratterizzare il componente in un ampio range di condizioni operative, permettendo di ottenere degli indicatori energetici specifici del sistema, a partire dai quali è stato possibile stimare la produttività elettrica e termica su base annuale in alcuni siti di riferimento, rappresentativi delle diverse zone climatiche dell'Italia.

Sistemi termo-fotovoltaici a concentrazione (CPVT)

Analogamente a quanto fatto per i sistemi Dish/Stirling, il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, ha effettuato un'analisi delle potenzialità di applicazione delle tecnologie termo-fotovoltaiche a concentrazione a partire da dati relativi al monitoraggio su breve e lungo periodo di un prototipo sistema CPVT installato presso i loro laboratori.

Tale analisi è stata preceduta da una descrizione sia dello stato dell'arte che delle principali caratteristiche delle tecnologie esistenti sul mercato. Dall'analisi è emerso che la tecnologia CPVT è praticamente matura nel caso dei dispositivi progettati per produrre calore a bassa temperatura. Per queste applicazioni, i sistemi CPVT sono generalmente caratterizzati da un basso rapporto di concentrazione e spesso utilizzano celle solari al silicio. I rendimenti elettrici e termici sono simili a quelli ottenibili con dispositivi solari dedicati, come moduli fotovoltaici piani in silicio cristallino e collettori termici. Aumentando il rapporto di concentrazione ed usando delle celle a giunzione multipla è possibile operare a temperatura più alta, senza una significativa penalizzazione dell'efficienza elettrica. Inoltre, in questo modo l'area superficiale del ricevitore può essere ridotta e il risultato è una diminuzione delle dissipazioni di calore. Queste caratteristiche rendono i sistemi CPVT adatti alla produzione di calore a media temperatura.

Dal punto di vista applicativo, i dispositivi CPVT con produzione di calore a media temperatura possono rispondere alla domanda di energia sia in ambito industriale che civile. Ci sono infatti molti processi industriali che utilizzano calore a livelli di temperatura tra 80 e 240°C. Nelle applicazioni di climatizzazione di edifici, invece, i dispositivi CPVT possono essere integrati con pompe di calore ad assorbimento e dare luogo a sistemi di poli-generazione in grado di fornire energia per il raffrescamento in aggiunta alla classica cogenerazione di elettricità e calore.

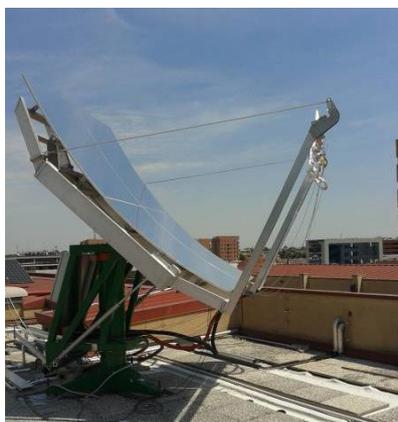


Figura 465. Prototipo del sistema CPVT durante le prove (Università di Padova)

I lavori futuri dovrebbero essere indirizzati a provare i prototipi progettati per la media temperatura al fine di verificare sperimentalmente le efficienze promettenti mostrate dalla modellazione. Allo stesso tempo è necessario concentrare gli sforzi sullo sviluppo e la valutazione di procedure standardizzate mirate a determinare l'affidabilità dei concentratori fotovoltaico-termici e ad ottenere strumenti generali che permettano un confronto oggettivo tra le prestazioni energetiche dei diversi sistemi.

La Figura 465 mostra il prototipo, installato presso l'Università di Padova, che è stato oggetto sia di studi modellistici che prove sperimentali al fine di stimare la produzione elettrica e termica in diverse località italiane.

Il grafico in Figura 466 mostra le curve di efficienza elettrica, termica e globale ottenute per il collettore considerato a seguito delle valutazioni modellistiche effettuate. Tali curve sono state confrontate con i dati sperimentali ottenuti nelle diverse campagne di misura condotte.

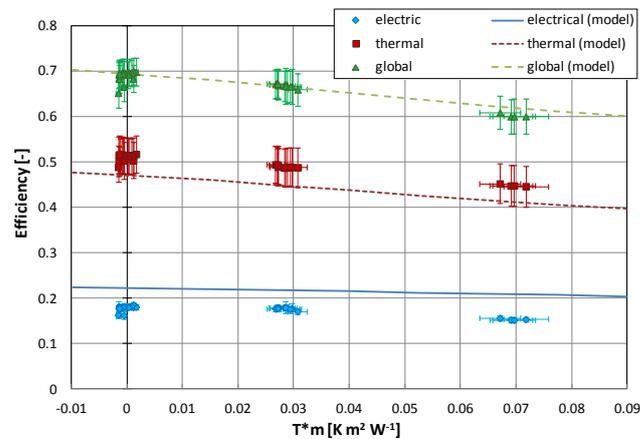


Figura 466. Efficienza in funzione della temperatura media ridotta: valori misurati (punti) e curve di previsione del modello in condizioni di stazionarietà con il carico elettrico connesso

b.3 Messa a punto della facility di test per prove indoor su collettori solari, implementando un sistema (“cielo artificiale”) in grado di riprodurre lo scambio radiativo nell’infrarosso che avviene tra un collettore e la volta celeste nelle ore di insolazione

In continuità con le attività avviate nella precedente annualità, è stata messa a punto la facility di test per l’esecuzione di prove indoor su collettori solari, implementando un sistema (detto “cielo artificiale”) in grado di riprodurre in ambiente chiuso lo scambio radiativo nell’infrarosso che avviene normalmente tra un collettore e la volta celeste nelle ore diurne, in presenza di radiazione solare.

Tale sistema ha principalmente la funzione di schermare la radiazione termica prodotta dalle lampade utilizzate per la generazione artificiale della radiazione solare, la cui temperatura superficiale (intorno a 150 °C), essendo sensibilmente maggiore di quella apparente del cielo (che si mantiene entro un range compreso tra 5 e 30°C), produce uno scambio radiativo nell’infrarosso tra collettore solare e lampade molto più elevato di quello che avviene nella realtà tra un collettore e il cielo naturale, alterando così la resa termica del collettore.

Al tal fine è stato progettato uno specifico sistema di schermaggio della radiazione termica prodotta dalle lampade, costituito essenzialmente da un telaio metallico provvisto di due superfici vetrate, tra le quali viene fatta fluire, mediante degli opportuni convogliatori, dell’aria fredda. In tale maniera è possibile asportare il calore in eccesso derivante dall’emissione nell’infrarosso delle lampade e quindi riprodurre, in condizioni indoor, uno scambio radiativo del tutto simile a quello che si realizzerebbe in una prova convenzionale condotta all’aperto. La Figura 467 mostra la vista assonometrica del dispositivo.

Il dispositivo è costituito essenzialmente da profilati estrusi in alluminio, tali da formare un telaio avente dimensioni in pianta pari a 2090 x 3120 mm sulla cui parte superiore sono ricavate delle fessure. Sulla parte inferiore e superiore del telaio sono disposti due convogliatori d’aria, ricavati da lamierino metallico in acciaio Inox dello spessore di 1 mm.

Le attività svolte, descritte nei dettagli nel rapporto RdS72013/094, si sono articolate come segue.

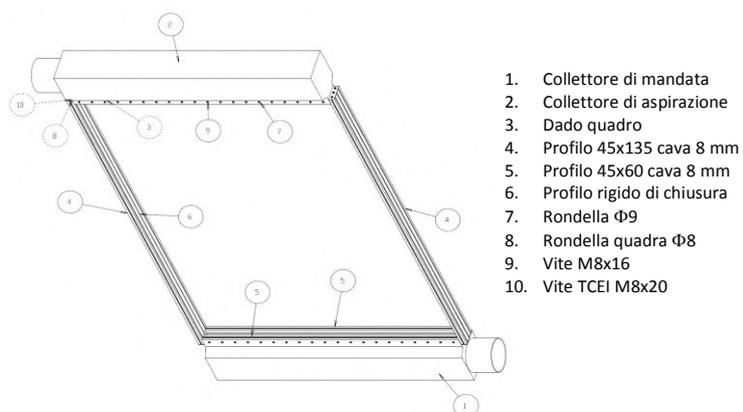


Figura 467. Sistema di schermaggio della radiazione termica prodotta dalle lampade

1. *Progettazione preliminare del "cielo artificiale" con l'obiettivo di dimensionare sia la struttura metallica in termini di larghezza dell'intercapedine entro cui far fluire l'aria di raffreddamento, sia di potenza frigorifera necessaria per mantenere l'aria alla temperatura desiderata*

Nello specifico sono stati individuati i parametri geometrici caratteristici del cielo artificiale, sono state valutate le potenze termiche scambiate in corrispondenza di diverse condizioni di temperatura ed infine sono state determinate le portate d'aria da inviare tra le superfici vetrate del cielo artificiale, necessarie ad asportare il calore in eccesso. Lo scambio radiativo tra il sistema di lampade ed il cielo artificiale è stato assimilato a quello tra due superfici piane, parallele ed opache in condizioni di equilibrio termico permanente.

La Figura 468 mostra l'andamento della potenza termica scambiata tra lampade e cielo artificiale al variare della temperatura superficiale del vetro esposto alle lampade in corrispondenza di una temperatura superficiale delle stesse pari a 150 °C (misurata sperimentalmente).

Il grafico in Figura 469 mostra invece l'andamento della portata d'aria di raffreddamento in funzione delle potenze termiche scambiate.

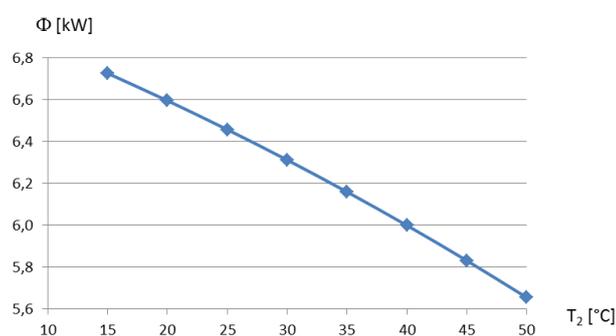


Figura 468. Potenza termica scambiata tra lampade e cielo artificiale vs temperatura superficiale del vetro esposto alle lampade (si assume una temperatura superficiale delle lampade di 150 °C)

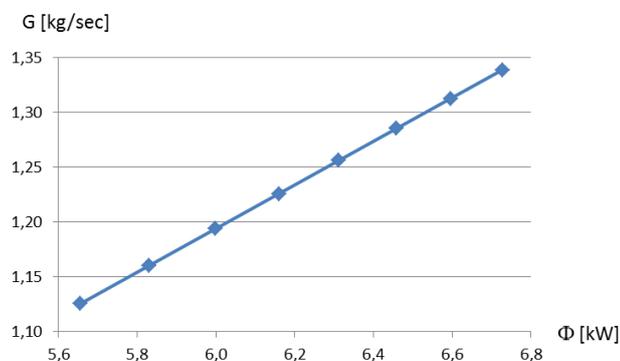


Figura 469. Portata d'aria di raffreddamento vs potenza termica scambiata

2. *Verifica preliminare delle scelte progettuali operate*

Mediante un'analisi agli elementi finiti, sono state condotte delle simulazioni dello scambio termico tra lampade e struttura del cielo artificiale permettendo di verificare la bontà delle scelte progettuali adottate.

3. *Progettazione esecutiva dei vari componenti e progettazione del circuito di raffreddamento costituito da una unità di trattamento aria (UTA) munita di un refrigeratore ad acqua della potenza nominale di circa 5 kW*

Sulla base di quanto emerso nelle valutazioni numeriche effettuate nelle fasi precedenti, è stata eseguita la progettazione esecutiva, sulla base della quale sono state stilate le specifiche tecniche necessarie per l'acquisizione di quanto necessario alla realizzazione del dispositivo.

4. *Assemblaggio dei componenti e prime verifiche funzionali.*

c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione

L'attività prevede la progettazione, realizzazione, messa in funzione e quindi l'analisi sperimentale del funzionamento di pompe di calore elettriche di nuova generazione, che utilizzano fluidi refrigeranti a basso impatto ambientale.

c.1 Realizzazione di una macchina frigorifera sperimentale di piccola potenza ($P_f = 3,0 \text{ kW}$) per la prova e la verifica prestazionale di differenti fluidi frigoriferi utilizzati nelle pompe di calore a compressione

Obiettivo del presente lavoro è la progettazione di due banchi prova per testare delle pompe di calore reversibili del tipo a compressione di vapore aria-acqua di piccola taglia.

A tal proposito si è sviluppato un modello matematico implementato in ambiente MATLAB sul quale si è eseguita un'analisi parametrica al fine di ottimizzare il processo di scelta dei componenti dell'impianto. In tale analisi sono stati assunti come parametri i seguenti: fluido, taglia del compressore, area scambiatore a piastre e area batteria alettata.

All'interno della sintesi sarà presentato brevemente dapprima il modello matematico, successivamente sarà illustrata la soluzione di impianto proposta, la quale è stata ottenuta attraverso l'elaborazione dei dati ottenuti dall'analisi parametrica. Dunque l'impianto scelto sarà caratterizzato in termini di performance in condizioni di progetto, ed infine allo scopo di avere una valutazione oggettiva dell'impianto stesso si calcoleranno gli indici SEER ed SCOP secondo la direttiva europea EN 14825 del 2013.

Modello

Il modello matematico si compone di due fasi principali, una prima fase di modellazione dei singoli componenti (compressore, valvola, evaporatore, condensatore e rigeneratore) ed una fase successiva di matching dei suddetti componenti al fine di calcolare il punto di funzionamento stazionario dell'impianto e le relative prestazioni.

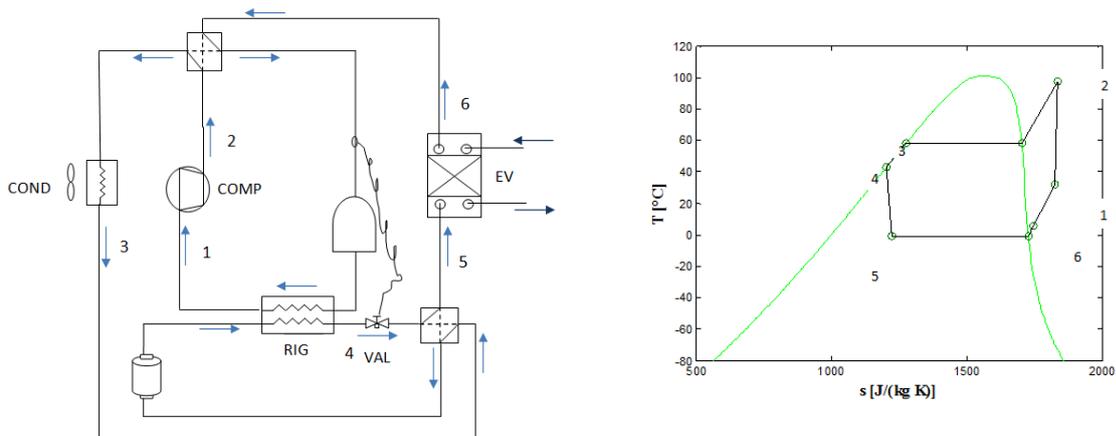


Figura 470. Schema impianto e ciclo termodinamico funzionamento macchina frigo

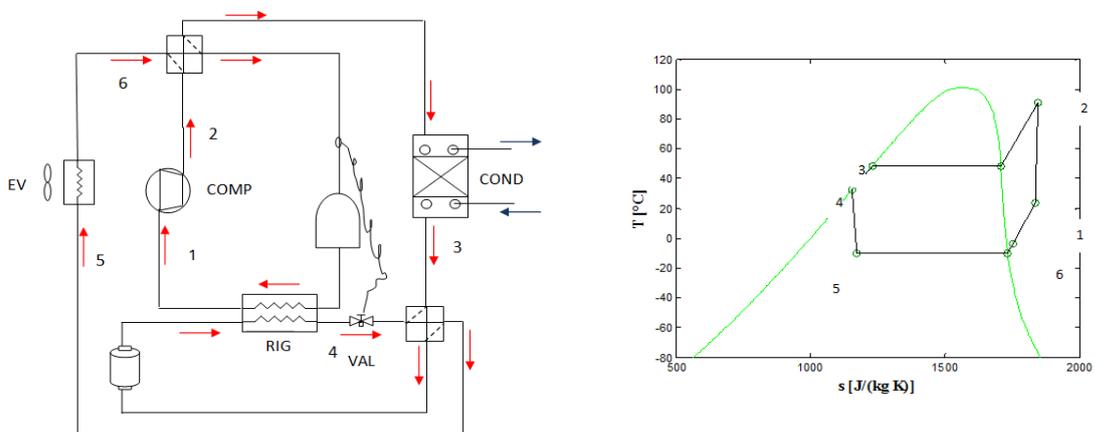


Figura 471. Schema impianto e ciclo termodinamico funzionamento pompa di calore

Compressore

Per quanto riguarda il compressore, il modello ne descrive il comportamento attraverso delle equazioni per la portata, per il rendimento globale, nonché per la potenza elettrica:

$$\dot{m} = \rho_1 C \frac{n}{60} \left[1 - \frac{V_n}{C} \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$\eta_g = a\beta^3 + b\beta^2 + c\beta + d \quad (2)$$

$$\dot{L} = \frac{\dot{L}_{is}}{\eta_g} \quad (3)$$

dove \dot{L}_{is} calcolato mediante la seguente equazione:

$$\dot{L}_{is} = \dot{m} \cdot (h_{2is} - h_1) \quad (4)$$

in cui h_1 e h_{2is} rappresentano l'entalpia in aspirazione al compressore e quella che si avrebbe alla mandata in una trasformazione isoentropica.

Nella relazione della portata massica C e V_n rappresentano rispettivamente la cilindrata ed il volume nocivo del compressore, n è la velocità di rotazione in [giri/min] mentre ρ_1 e ρ_2 rappresentano la densità del refrigerante all'aspirazione e alla mandata.

Il rendimento globale è calcolato mediante una polinomio di terzo grado in β , rapporto di compressione. Mentre per quanto riguarda il rendimento isoentropico della trasformazione, questo si è assunto pari a 0,92.

Il modello va calibrato in funzione dei dati di catalogo disponibili per il compressore considerato. La calibrazione restituisce i parametri geometrici C e V_n ed i coefficienti del polinomio del rendimento.

Condensatore ed Evaporatore

Gli scambiatori di calore adottati nell'impianto da modellare sono costituiti da una batteria alettata raffreddata ad aria ambiente ed uno scambiatore a piastre con flussi in controcorrente. Definita la geometria degli scambiatori e le condizioni al contorno, il modello calcola la potenza termica scambiata ed i profili di temperatura ai due scambiatori.

Di seguito (figura 472) sono rappresentati i profili di temperatura dei fluidi all'interno degli scambiatori di calore per una fissata configurazione di impianto, operante da macchina frigo.

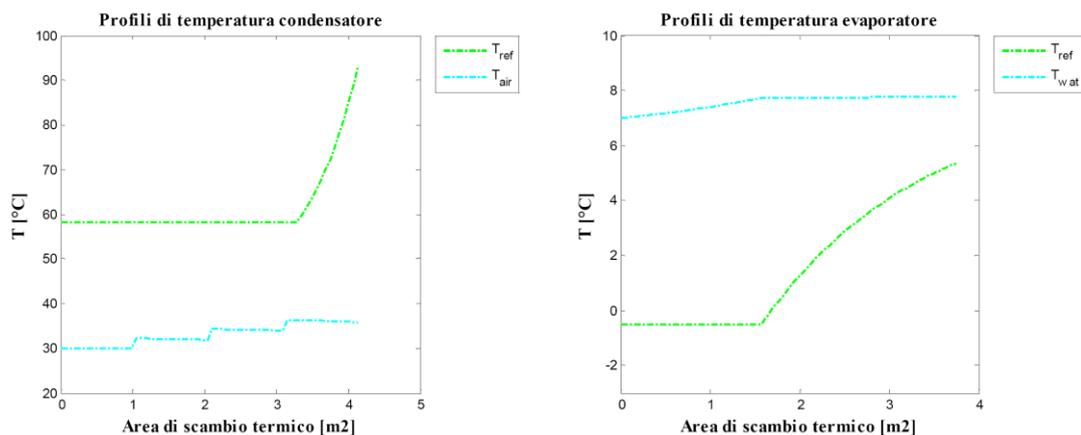


Figura 472. Profili di temperatura al condensatore ed all'evaporatore, funzionamento da macchina frigorifera

Dal punto di vista modellistico, la potenza termica scambiata al condensatore e all'evaporatore è ricavata in maniera seguente:

$$\dot{Q}_{st} = \int d\dot{Q}_{st} \quad (5)$$

dove

$$d\dot{Q}_{st} = U \cdot (T_{ref} - T_{f.t.}) \cdot dA \quad (6)$$

In cui il coefficiente di scambio termico globale U è calcolato come:

- Scambiatore a piastre:

$$U = \left(\frac{1}{h_{f.t.}} + \frac{1}{h_{ref}} \right)^{-1} \quad (7)$$

- Batteria alettata:

$$U = \left(\frac{1}{h_{f.t.}} + \frac{1}{h_{ref} \cdot \frac{A_i}{A_e \cdot \eta_{al}}} \right)^{-1} \quad (8)$$

dove si è considerata trascurabile la resistenza termica del metallo interposto tra i due fluidi essendo esso nella maggior parte dei casi rame o alluminio. $h_{f.t.}$ e h_{ref} rappresentano rispettivamente il coefficiente di scambio termico convettivo lato fluido termovettore e lato refrigerante le cui relazioni sono riportate in Appendice. Per quanto riguarda la batteria alettata, A_i ed A_e rappresentano rispettivamente l'area interna dei tubi che si interfaccia con il refrigerante, e l'area esterna della batteria, che si interfaccia invece con l'aria:

$$A_i = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L_{bt} \cdot N_t \cdot N_r \quad (9)$$

$$A_e = [2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot (L_{bt} - s_{al} \cdot N_{al}) \cdot N_t \cdot N_r] + \left[2 \cdot \left(B_{bt} \cdot H_{bt} - \frac{\pi d^2}{4} \cdot N_t \right) \cdot N_{al} \right] \quad (10)$$

Infine con η_{al} si è indicato il rendimento delle alette, posto pari ad 1.

Le temperature di refrigerante e fluido termovettore in ogni sezione dello scambiatore si ottengono a partire dalla conoscenza della potenza scambiata e dell'entalpia nella sezione precedente:

$$dh_{ref} = \frac{d\dot{Q}_{st}}{\dot{m}_{ref}} \quad (11)$$

$$dh_{f.t.} = \frac{d\dot{Q}_{st}}{\dot{m}_{f.t.}} \quad (12)$$

Dalla potenza scambiata e dall'entalpia si risale alla temperatura di refrigerante e fluido termovettore in ogni sezione dello scambiatore (si veda Appendice del Rapporto Tecnico Completo).

Tecnica Numerica Risolutiva

Per quanto riguarda lo scambiatore a piastre, il campo di temperature dei fluidi si risolve con un modello unidimensionale, ritenendoli a correnti parallele in controcorrente. Si discretizza il tratto percorso dal refrigerante e in corrispondenza quello dell'acqua in un numero finito di elementi, N_{el} , si fissano le condizioni al contorno: (portata massica, pressione ed entalpia di ingresso lato refrigerante e portata massica e temperatura di uscita lato acqua). Tramite l'equazione dello scambio termico (6) si ricava la potenza termica scambiata nel singolo elemento. Quindi dal bilancio di energia lato refrigerante (11) e lato acqua (12) si ricavano le temperature dei fluidi all'elemento successivo e si itera la procedura per tutti gli elementi.

Per le batterie alettate vista la potenza esigua scambiata e il campo di temperature di esercizio dei refrigeranti si ipotizza che il tubo si sviluppi su un circuito singolo e inoltre che il percorso del tubo completi un rango prima di passare al successivo. Si discretizzano: il tratto percorso dal refrigerante lungo il tubo per un singolo rango in un numero finito di elementi, N_{el} , tali da avere un sottomultiplo intero di $N_{al} \times N_{tubi}$; e l'aria in ingresso al rango in una

matrice di elementi pari al numero di elementi N_{el} e di dimensioni coerenti con la discretizzazione fatta per il tubo (Figura 473).

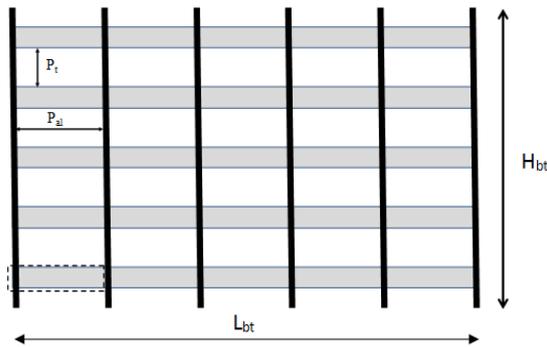


Figura 473. Schema batteria alettata (vista frontale)

Fissate le condizioni al contorno: (portata massica, pressione e entalpia di uscita lato refrigerante e portata massica e temperatura di ingresso lato aria al primo rango (supposta uniforme) tramite l'equazione dello scambio termico (6) si ricava la potenza termica scambiata nel singolo elemento. Quindi dal bilancio di energia lato refrigerante (11) e lato fluido secondario (12) si ricavano la temperatura del refrigerante all'elemento successivo, e la temperatura dell'aria al rango successivo per l'elemento corrispondente nel verso di percorrenza dell'aria.

Completata l'integrazione su un rango sarà noto tutto il campo di temperature per l'aria (nuova condizione al contorno) e la pressione e l'entalpia del refrigerante al

primo elemento. Di conseguenza si può iterare la procedura svolta per il primo rango

Valvola

La valvola adoperata nell'impianto è di tipo termostatico, il modello calcola la portata che attraversa tale organo attraverso la relazione seguente:

$$\dot{m} = A \cdot \rho_{liq} \cdot \sqrt{\frac{2 \bar{v} (p_{co} - p_{ev})}{\xi}} \quad (13)$$

In cui ρ_{liq} rappresenta la densità del liquido in ingresso alla valvola, rappresenta il volume specifico medio del fluido durante l'espansione ad entalpia specifica costante dalla p_{co} pressione di condensazione a quella di evaporazione, calcolato in maniera seguente:

$$\bar{v} = \frac{\int_{p_{co}}^{p_{ev}} v dp}{(p_{ev} - p_{co})} \quad (14)$$

Infine p_{co} e p_{ev} rappresentano le pressioni di condensazione ed evaporazione.

Con l'ausilio dei dati di catalogo si effettua la calibrazione del parametro $A/\sqrt{\xi}$ in funzione delle caratteristiche costruttive della valvola, ricavandosi il seguente polinomio di secondo grado in T_{ev} :

$$\frac{A_0}{\sqrt{\xi}} = aT_{ev}^2 + bT_{ev} + c \quad (15)$$

Rigeneratore

Il rigeneratore è rappresentato da uno scambiatore a piastre in cui il refrigerante è da un lato vapore surriscaldato e dall'altro liquido sottoraffreddato. Per il calcolo della potenza termica scambiata il modello fa riferimento alla seguente equazione:

$$\dot{Q}_{rig} = UA_{rig} \cdot (T_{f.c.} - T_{f.f.}) \quad (16)$$

In cui $T_{f.c.}$ e $T_{f.f.}$ rappresentano rispettivamente le temperature in ingresso allo scambiatore del fluido caldo e del fluido freddo, mentre il coefficiente di scambio termico UA_{rig} è calcolato mediante la seguente relazione:

$$UA_{rig} = \left(\frac{1}{h_{f.c.} \cdot A_{st,p}} + \frac{1}{h_{f.f.} \cdot A_{st,p}} \right)^{-1} \quad (17)$$

In cui i coefficienti di scambio termico convettivo sono ricavati a partire dalle relazioni per lo scambio termico all'interno di scambiatori a piastre con refrigerante in singola fase (si veda Appendice del Rapporto RdS72013/095).

Matching dei componenti

Una volta descritto il modello dei singoli componenti si procede alla determinazione del punto di funzionamento del sistema per fissati componenti (in termini di tipologia e taglia) e condizioni al contorno; in particolare devono essere assegnati:

- Fluido refrigerante
- Surriscaldamento a valle dell'evaporatore
- Condizioni a valle del condensatore
- Fluidi termovettori
- Portate dei fluidi termovettori
- Temperature di uscita dei f.t. dai rispettivi scambiatori
- Cilindrata, volume nocivo e rendimento del compressore
- Geometria di tutti gli scambiatori di calore.

Una volta fissati i dati elencati sopra, si vuole determinare il corrispondente ciclo termodinamico con il quale funzionerà l'impianto e la portata massica di refrigerante, da cui poi saranno noti tutti i flussi energetici e quindi le prestazioni effettive del sistema.

Per raggiungere questo scopo, si procede fissando un dominio in termini di temperature di condensazione e di evaporazione ampio all'interno del quale ricercare la soluzione e consistente con le temperature dei fluidi secondari assegnati. Tale dominio viene ridotto in base alla mappa di funzionamento del compressore fornita dal costruttore e, successivamente, in base alla temperatura minima di evaporazione garantita dalla valvola di espansione per ogni temperatura di condensazione, intesa come la minima tra quella di accoppiamento con il compressore e quella imposta da un eventuale MOP (Maximum Operating Pressure).

Per ogni coppia di temperature del dominio, si determina la portata massica elaborata dal compressore attraverso l'equazione (1) e risolvendo il modello del rigeneratore; quindi sono noti tutti i punti del ciclo, laddove sono fissati il surriscaldamento imposto dalla valvola, mentre il sottoraffreddamento in uscita dal condensatore si può ritenere nullo data la presenza del ricevitore di liquido. Di conseguenza sono note le potenze scambiate in ciascun componente, come rappresentato a titolo di esempio nelle Figure 474 e 475.

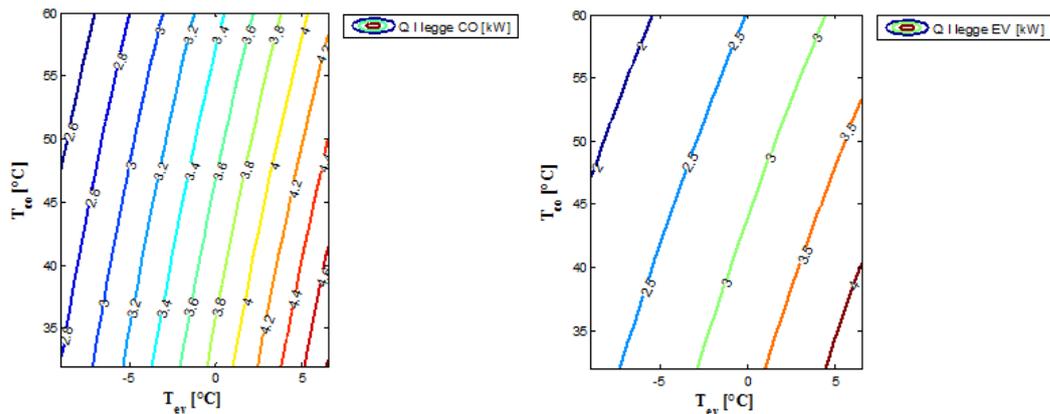


Figura 474. Potenza termica di I legge al condensatore e all'evaporatore

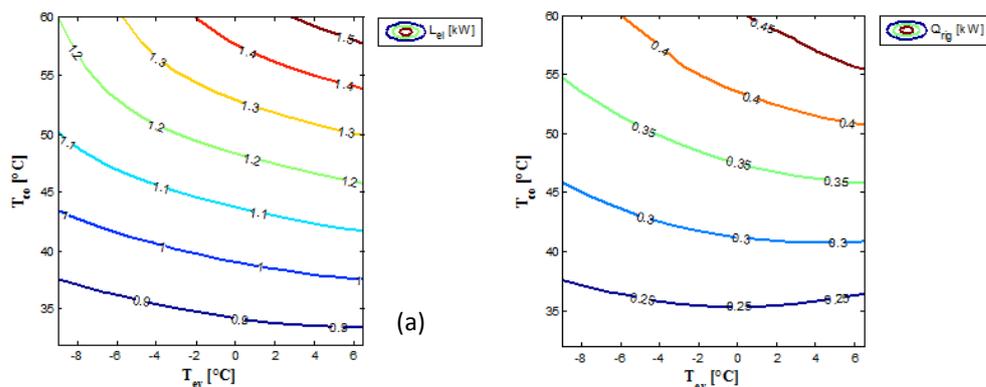


Figura 475. (a) Potenza elettrica assorbita al compressore; (b) Potenza termica al rigeneratore

A questo punto si risolvono per ciascuna coppia di T_{co} e T_{ev} , le equazioni per gli scambiatori di calore al fine di determinare, per le portate massiche fissate e le temperature di ingresso dei fluidi secondari, le potenze termiche scambiate in termini di scambio termico.

Quindi, si determina il luogo di punti della mappa lungo il quale si ha l'uguaglianza tra le potenze termiche calcolate dal modello del compressore e del rigeneratore (potenza di prima legge) e quelle calcolate con lo scambio termico, sia per l'evaporatore e per il condensatore e quindi l'eventuale punto di intersezione tra questi due luoghi di punti che rappresenta il punto di funzionamento per le condizioni al contorno fissate.

$$\dot{Q}_{st,ev} = \dot{Q}_{ev,comp} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{st,co} = \dot{Q}_{co,comp} \quad (19)$$

Scelta dell'impianto

L'analisi parametrica permette di individuare i componenti dell'impianto tali da ottenere determinate prestazioni, in maniera da poter giungere ad una scelta opportuna degli stessi.

Si supponga di desiderare come precedentemente dichiarato che l'impianto frigo abbia le seguenti prestazioni di progetto:

- Resa Frigo ≥ 3 kW
- Temperature ambiente = 30 °C.
- Temperatura acqua in uscita dal condensatore = 7°C.

Dall'analisi parametrica si evince che è necessario optare per un compressore di cilindrata almeno pari a 63 cc, al fine di avere una resa frigo di almeno 3 kW, inoltre indipendentemente dalla grandezza degli scambiatori, avendo fissato la temperatura di uscita dell'acqua dall'evaporatore, cilindrata minori garantiscono COP maggiori. Dunque si opterà per i seguenti componenti.

- Compressore Dorin H150CC (Cilindrata = 63 cc)

Geometria scambiatore a piastre:

H _p [cm]	B _p [cm]	P _p [mm]	N _p [ad]
74	19	1	45

Geometria batteria alettata:

L _{bt} [cm]	P _t [mm]	P _r [mm]	N _t [ad]	N _r [ad]	N _{ai} [ad]	S _{ai} [mm]	r _e [mm]	r _i [mm]
71	40	35	8	6	108	0.13	6	5

Geometria Rigeneratore (scambiatore a piastre):

H _p [cm]	B _p [cm]	P _p [mm]	N _p [ad]
48	20	3	8

Con tale configurazione si ottengono i seguenti andamenti dei profili di temperatura agli scambiatori rispettivamente in modalità macchina frigo e pompa di calore (Figura 476 e 477).

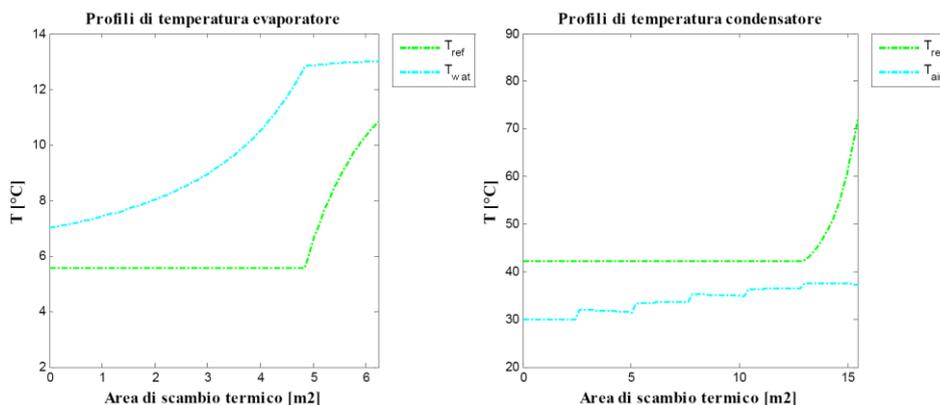


Figura 476. Macchina frigo - Profili di temperatura all'evaporatore e al condensatore

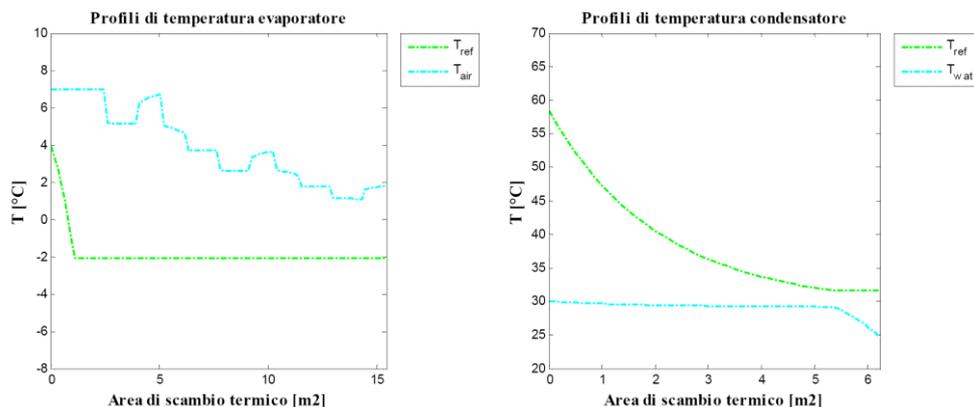


Figura 477. Pompa di calore – Profili di temperatura all’evaporatore e al condensatore

L’impianto fornisce le prestazioni riportate in Tabella 112.

Tabella 112. Prestazioni impianto

Performance (di progetto)	Macchina Frigo	Pompa di Calore
Q_{ev} [kW]	3,79	3,11
L_{el} [kW]	1,10	0,84
Q_{co} [kW]	4,45	3,61
COP [ad]	3,43	4,31
Q_{rig} [kW]	0,33	0,24
$m_{f,t,co}$ [kg/s]	0,5	0,15
$m_{f,t,ev}$ [kg/s]	0,15	0,50
m_{ref} [kg/s]	0,023	0,018
T_{co} [°C]	42,1	31,6
T_{ev} [°C]	5,6	-2,1
T_2 [°C]	68,8	58,4
$T_{in,cond}$ [°C]	30	24,2
$T_{out,cond}$ [°C]	38,8	30
$T_{in,ev}$ [°C]	13	7
$T_{out,ev}$ [°C]	7	0,8

Calcolo dell’indice SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) per la soluzione proposta

SEER							
Outdoor Air [°C]	Part Load Ratio [%]	Part Load [kW]	Declared Capacity [kW]	EER at Declared Capacity	C_d	C.R.	EER at Part Load
35	100	3,62	3,62	2,97	0,25	1,00	2,97
30	74	2,68	3,80	3,45	0,25	0,71	3,20
25	47	1,70	3,96	3,95	0,25	0,43	3,39
20	21	0,76	4,13	4,61	0,25	0,18	3,67

Calcolo Bin per SEERon						
J	Outdoor Temperature [°C]	Hours [h]	Cooling Load [kW]	EER _{PL}	Annual Cooling Demand [kWh]	Annual Energy Input [kWh]
1	17	205	0,19	3,67	39	11
2	18	227	0,38	3,67	86	24
3	19	225	0,57	3,67	129	35
4	20	225	0,76	3,67	171	47
5	21	216	0,95	3,60	206	57
6	22	215	1,14	3,54	246	69
7	23	218	1,33	3,49	291	83
8	24	197	1,52	3,43	300	87
9	25	178	1,71	3,39	305	90
10	26	158	1,90	3,35	301	90
11	27	137	2,09	3,31	287	87
12	28	109	2,29	3,27	249	76
13	29	88	2,48	3,23	218	67
14	30	63	2,67	3,19	168	53
15	31	39	2,86	3,15	111	35
16	32	31	3,05	3,11	94	30
17	33	24	3,24	3,07	78	25
18	34	17	3,43	3,02	58	19
19	35	13	3,62	2,97	47	16
20	36	9	3,81	2,97	34	12
21	37	4	4,00	2,97	16	5
22	38	3	4,19	2,97	13	4
23	39	1	4,38	2,97	4	1
24	40	0	4,57	2,97	0	0
Σ =>					3451	1025

Con riferimento alle tabelle riportate sopra si ottiene il seguente valore del SEER:

$$\text{SEER} = \frac{3451}{1025} = \mathbf{3,37}$$

Calcolo dell'indice SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) per la soluzione proposta

Dati per SCOP							
Outdoor Air [°C]	Part Load Ratio [%]	Part Load [kW]	Declared Capacity [kW]	COP at Declared Capacity	C _d	CR	COP at Part Load
2	100	3,11	3,11	3,40	0,9	1,00	3,40
7	64	2,00	3,57	3,86	0,9	0,56	3,58
12	29	0,89	4,06	4,28	0,9	0,22	3,15

Calcolo Bin per SCOPon						
<i>j</i>	Outdoor Temperature [°C]	Hours [h]	Heating Load [kW]	COP_{PL}	Annual Heating Demand [kWh]	Annual Energy Input [kWh]
1	2	3	3,11	3,40	9	3
2	3	22	2,89	3,49	64	18
3	4	63	2,66	3,55	168	47
4	5	63	2,44	3,58	154	43
5	6	175	2,22	3,59	389	108
6	7	162	2,00	3,58	324	90
7	8	259	1,78	3,54	460	130
8	9	360	1,55	3,48	560	161
9	10	428	1,33	3,40	570	168
10	11	430	1,11	3,29	477	145
11	12	503	0,89	3,15	447	142
12	13	444	0,67	2,99	296	99
13	14	384	0,44	2,81	171	61
14	15	294	0,22	2,61	65	25
$\Sigma \Rightarrow$					4152	1240

Con riferimento alle tabelle riportate sopra si ottiene il seguente valore del SCOP:

$$SCOP = \frac{4152}{1240} = 3,35$$

c.2 Campagna di prove sperimentali di un prototipo di pompa di calore ad CO₂ (R744) invertibile del tipo aria-aria, dedicato alla climatizzazione di gallerie commerciali e grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide

Il risultato di questa attività di ricerca è quello di mettere in evidenza le mappe di funzionamento di un prototipo di pompa di calore ad R744 (CO₂), invertibile del tipo aria-aria (roof-top), durante il periodo invernale ed estivo. Il prototipo realizzato è stato progettato al fine di soddisfare le esigenze di climatizzazione di gallerie commerciali e di grossi edifici del terziario che si trovano in zone climatiche rigide. Il prototipo realizzato ed installato a servizio dell'Edificio F-76 (Centro Ricerche ENEA di Casaccia), è stato costantemente monitorato al fine di acquisire i dati di funzionamento per poterne valutare le prestazioni durante il riscaldamento invernale degli ambienti (COP) e durante la climatizzazione degli stessi (EER). In questo modo è stato possibile ottenere una mappa completa delle prestazioni dell'impianto in inverno e in estate al fine di valutare quali sono i parametri principali che influenzano il comportamento della macchina.

Roof-Top a CO₂

Il roof-top a pompa di calore ad R744 (CO₂) installato nel C.R. Casaccia è stato progettato e realizzato con l'obiettivo di coprire i fabbisogni termici legati alla climatizzazione annuale dell'edificio F76, il suo funzionamento viene costantemente monitorato al fine di valutarne COP ed EER nelle reali condizioni di funzionamento.

L'edificio F76 (Figura 478) ha una superficie di 215 m² ed è costituito da 10 uffici dotati di sensori di temperatura e serrande di parzializzazione, che regolano la portata di aria in base ai valori di temperatura rilevati, 2 bagni, una vecchia centrale termica e una frigorifera.

Il roof-top è una macchina frigorifera del tipo aria/aria dotata già delle predisposizioni per i canali di mandata e ripresa dell'aria. Essa è collocata sui tetti degli edifici ma, nel nostro caso, per motivi di sperimentazione è situata a livello del suolo (Figura 479). Questa macchina è del tipo reversibile o polivalente, con la funzione di refrigerare in funzionamento estivo o riscaldare in quello invernale. Tale impianto presenta come dati di targa in funzionamento invernale una potenza termica al gas-cooler di circa 36,3 kW ad una temperatura esterna di +5 °C



Figura 478. Edificio F76- C.R. ENEA Casaccia



Figura 479. Roof-top posizionato al suolo per motivi di sperimentazione

con temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler a +16 °C e in uscita pari a 34 °C. L'assorbimento elettrico massimo è pari a 14 kW e la massima pressione di esercizio è pari a 105 bar. Il circuito frigorifero integrato nell'unità roof-top consente il settaggio di sette configurazioni impiantistiche differenti, al variare della posizione di cinque apposite valvole motorizzate (Tabella 113, Figura 480). Durante questo lavoro si è utilizzata una sola configurazione impiantistica per la stagione di riscaldamento ("inverno classico") e lo schema "estate" per la stagione di raffreddamento.

L'aspetto importante è che interagisce sia sul lato esterno che sul lato interno con aria, che a sua volta viene impegnata direttamente per la climatizzazione dell'ambiente servito dall'impianto. Le macchine solitamente utilizzate per le stesse applicazioni invece

impiegano come fluido termovettore l'acqua, il che inserisce un trasferimento di calore aggiuntivo (aria - acqua - aria) con complicazioni sia di tipo strettamente impiantistico (bisogna approntare e gestire la circolazione dell'acqua) che termodinamico (l'ulteriore scambio di calore induce generazioni entropiche maggiori a parità di altri fattori).

La macchina è dotata di un evoluto sistema BMS (Building Management System) in grado di gestire le corrette condizioni termo igrometriche dei vari ambienti, variando la portata d'aria immessa nei vari locali e modificandone anche la temperatura d'immissione. Tutti gli apparati di regolazione e controllo che gestiscono il funzionamento del roof-top, ne effettuano il monitoraggio, permettono il controllo in remoto del sistema edificio-impianto sono installati all'interno del quadro elettrico di potenza e controllo.

Tabella 113. Configurazione delle valvole al variare della modalità di funzionamento

MODALITA' DI FUNZIONAMENTO	CONFIGURAZIONE VALVOLE						
	1	2	3	4	A	B	5
Estate	a	a	/	a	/	/	a
Inverno classico	b	a	b	b	/	/	a
Inverno 2 evap. In serie	b	b	b	b	/	/	a
Inverno con 2 rigenerativi	b	a	a	b	/	/	a
Defrosting classico	b	a	b	b	100%	/	b
Defrosting con 2 rigenerativi	b	a	a	b	100%	/	b
Defrosting inverso	a	b	/	a	100%	100%	b
Defrosting inverso 2	a	a	/	a	100%	/	b

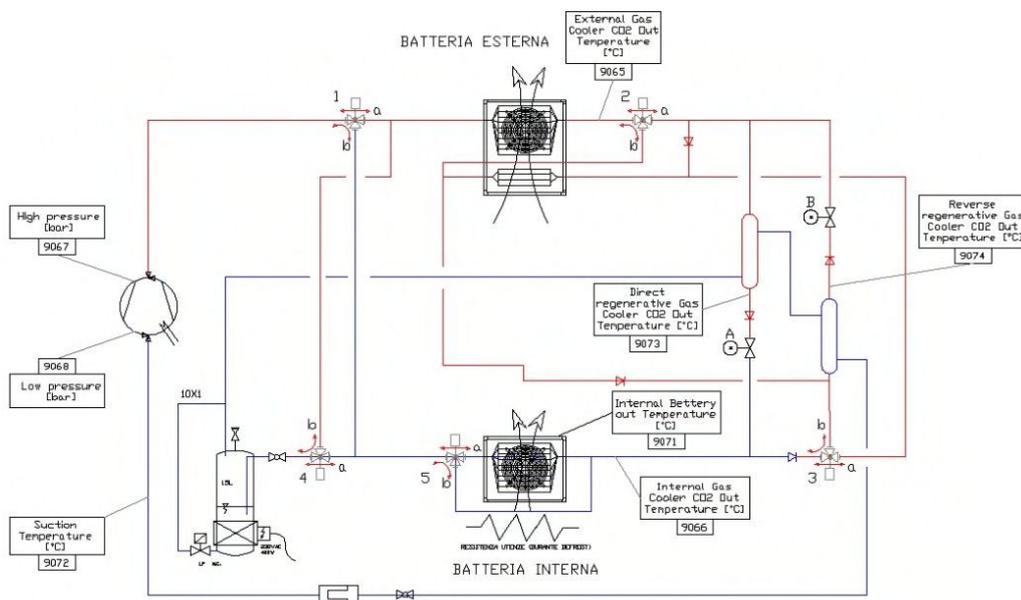


Figura 480. Schema generale impianto

Procedura di prova ed elaborazione dei dati

Quella esposta di seguito è la prima campagna sperimentale condotta su questa macchina ed è stata effettuata in modo da definire le sue potenzialità durante il periodo invernale e estivo, investigando sui parametri che maggiormente incidono sulle prestazioni della macchina.

Per lo svolgimento delle prove, le grandezze di interesse sono state mediate su un intervallo di tempo di cinque minuti, dopo aver verificato il superamento, da parte dell'impianto, di un regime di funzionamento transitorio iniziale e il raggiungimento di un regime stazionario, inteso come un arco di tempo di almeno 15 minuti in cui ciascun valore misurato delle grandezze di interesse non superi del 3% il corrispondente valor medio.

In inverno, per la potenza termica al gas-cooler si è utilizzata la seguente relazione:

$$P_{gc} = \rho_{a,out} \dot{V}_{a,out} [c_{pa}(T_{out} - T_{in}) + \Delta h_{vs}(\omega_{out} - \omega_{in}) + c_{pv}(\omega_{out} T_{out} - \omega_{in} T_{in})]$$

Mentre in estate per la potenza frigorifera all'evaporatore:

$$P_{ev} = \rho_{a,out} \dot{V}_{a,out} [c_{pa}(T_{in} - T_{out}) + \Delta h_{vs}(\omega_{in} - \omega_{out}) + c_{pv}(\omega_{in} T_{in} - \omega_{out} T_{out})]$$

dove ρ è la densità in kg/m^3 , \dot{V}_a portata volumetrica in m^3/s , T è la temperatura in $^\circ\text{C}$, h è l'entalpia specifica in kJ/kg , ω è l'umidità specifica in $\text{g}_{\text{acqua}}/\text{kg}_{\text{aria}}$, c_{pv} è il calore specifico a pressione costante in $\text{kJ}/(\text{kg K})$ e i pedici a e v sono usati rispettivamente per l'aria e il vapor d'acqua. Gli stati termodinamici in ingresso e in uscita lato aria sono determinati mediante misure di temperatura e umidità relative, tramite le ben note relazioni per il calcolo delle proprietà dell'aria umida; la portata volumetrica tramite un anemometro posto nella sezione di uscita.

Durante il periodo invernale, il COP della pompa di calore è stato calcolato come:

$$COP = \frac{P_{gc}}{P_{el,pdc}}$$

mentre nel periodo estivo, l'EER, come:

$$EER = \frac{P_{ev}}{P_{el,pdc}}$$

laddove la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore tiene conto della potenza elettrica totale assorbita al netto di quella per i ventilatori di ripresa e mandata dell'aria.

Rilievo e analisi dati sperimentali invernali

Per una fissata temperatura dell'aria esterna pari a 6°C sono state condotte prove al variare della temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler, per la quale non si fissano valori limite o controlli particolari poiché le prestazioni dell'impianto vengono esaminate disgiuntamente da una qualsivoglia applicazione, e facendo variare la frequenza del compressore e la potenza dei ventilatori.

L'indagine sperimentale invernale ha quindi permesso di ottenere 115 punti sperimentali, nelle condizioni operative riportate in Tabella 114.

Tabella 114. Condizioni test sperimentale realizzato in inverno

Condizioni di test			
T esterna [$^\circ\text{C}$]	T miscela [$^\circ\text{C}$]	Frequenza Compressore [Hz]	Portata Ventilatori [%]
6	da 6 a 20	38,40 - 59,50	70 - 100

Nelle Figure 481 e 482 si riportano, a titolo di esempio, i cicli termodinamici sui piani pressione-entalpia specifica e temperatura-entropia specifica compiuti dalla CO_2 alla frequenza minima e massima di funzionamento del compressore e i relativi profili di temperatura dell'aria tra ingresso (punto 7) e uscita (punto 8) del gas-cooler, fissate le altre condizioni operative. Osservando la Figura 481 si nota come la variazione di entalpia specifica tra la mandata e l'aspirazione del compressore sia quasi indipendente dalla frequenza del compressore: ne risulta che la potenza elettrica assorbita dal compressore laddove, come in questo caso, siano uguali le pressioni al gas-cooler, segue l'aumento della portata massica. L'aumento della portata massica si riflette anche nelle perdite di carico in condizioni bifasiche all'evaporatore, le quali risultano molto più marcate nel caso mostrato di funzionamento a frequenza massima (e pari a 6 bar, contro i 2 del caso a frequenza minima). Dalla Figura 482 si nota invece che il ciclo a 59,50 Hz presenta una differenza di temperatura ingresso-uscita al gas-cooler della CO_2 più bassa: ciò si riflette in una diminuzione della variazione di entalpia specifica a fronte di un aumento di portata massica.

Osservando le variazioni di temperatura dell'aria nei due casi si nota che nel funzionamento alla frequenza massima la temperatura d'uscita della stessa dal gas-cooler aumenta, ovvero che la potenza termica scambiata al gas-cooler è aumentata. Inoltre, si osserva un notevole aumento delle perdite di carico all'evaporatore a seguito dell'aumento della portata massica di CO₂.

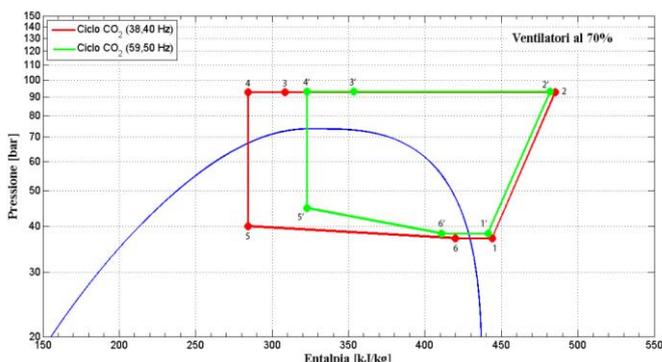


Figura 481. Cicli transcritici rigenerativi della CO₂ al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore, piano logp-h

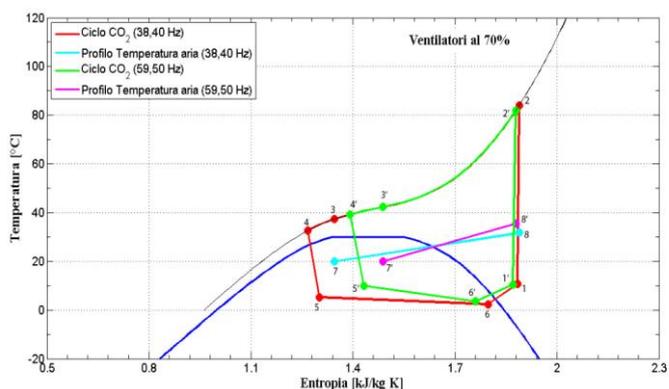


Figura 482. Cicli transcritici rigenerativi della CO₂ al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore, piano T-s. (Nota: per il fluido aria le entropie specifiche non sono in scala)

Uno dei parametri che maggiormente influenza le prestazioni del roof-top è la temperatura di ingresso dell'aria alla batteria interna (gas-cooler). Le acquisizioni sono state dunque elaborate e presentate in funzione di tale parametro nei grafici delle Figure 483-485 al fine di fornire una mappatura delle prestazioni dell'impianto.

In Figura 483 si riportano le temperature di mandata dell'aria, misurate a valle del gas-cooler, in funzione della temperatura dell'aria in ingresso e al variare della frequenza del compressore. La portata volumetrica d'aria varia tra il massimo pari a 5500 m³/h e il 70% di quella massima. Si osserva che all'aumento della frequenza del compressore corrisponde una più elevata temperatura d'uscita dell'aria dal gas-cooler, ciò a causa dell'aumento di capacità termica della CO₂ conseguenza dell'aumento della frequenza di funzionamento. Confrontando invece il funzionamento al variare della portata d'aria si osserva come, per una data condizione di funzionamento della pompa di calore, un aumento della portata d'aria in ingresso comporti una riduzione di temperatura della stessa alla mandata. Vale la pena osservare che, in determinate condizioni, la temperatura d'aria alla mandata risulta essere inadatta alla climatizzazione invernale (sia in eccesso che soprattutto in difetto), sebbene una simile valutazione esuli dagli scopi di questo lavoro.

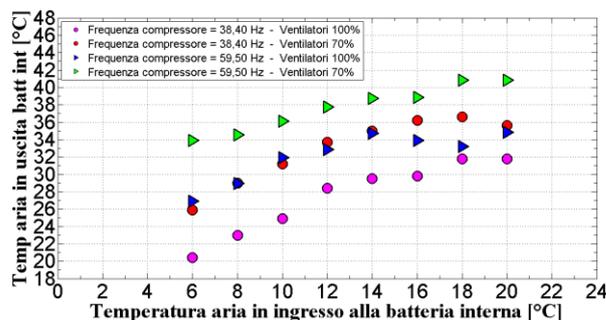


Figura 483. Temperatura di mandata in funzione della temperatura dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

In Figura 484 si riportano le potenze termiche scambiate al gas-cooler al variare della frequenza del compressore e al variare della portata d'aria tra il 70% e la massima. Come già evidenziato in precedenza, l'aumento della frequenza e dunque della portata massica di CO₂ elaborata prevale sulla diminuzione della variazione di entalpia, pertanto la potenza termica risulta crescente con la frequenza di funzionamento del compressore, fissata la portata d'aria. La sua proporzionalità inversa alla temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler, per temperature in ascissa maggiori di 12 °C, è dovuta alla diminuzione del ΔT medio tra i due fluidi che si verifica all'aumentare della temperatura dell'aria in ingresso al gas-cooler. Da questo punto di vista, rappresentano un'eccezione i due punti di funzionamento a 6 °C di temperatura di ingresso dell'aria e 38Hz, i quali mostrano, al contrario, una potenza termica scambiata leggermente inferiore in confronto ai rispettivi casi a 8 °C della temperatura in ascissa. Ciò è dovuto al sistema di regolazione che interviene, a 6 °C, abbassando la pressione massima dei cicli a 80 bar circa (contro i 94 dei cicli a temperature leggermente superiori) e dunque le temperature di ingresso al gas-cooler della CO₂. Ciò comporta che per le due differenti condizioni lo scambio termico avviene con un ΔT medio tra i due fluidi pressoché costante. Al variare della portata d'aria, invece, stanti trend appena evidenziati, si osserva solo come i valori della potenza termica scambiata siano mediamente più bassi nel caso al 70% della portata d'aria, in virtù del minore coefficiente di scambio termico.

In Figura 485 si raccolgono i valori del COP del roof-top in funzione della frequenza del compressore con i ventilatori a pieno regime e parzializzati al 70%. Si nota che per ciascuna frequenza il COP decresce con l'aumento della temperatura dell'aria in ingresso alla batteria interna, a partire dai 12 °C. Ciò è dovuto al fatto che, mentre la potenza elettrica assorbita dal compressore (e dai ventilatori) si mostra quasi indipendente da questa temperatura (a meno dei già citati casi in cui interviene la regolazione di pressione al gas-cooler), la potenza termica scambiata mostra, a partire da questa temperatura, l'andamento decrescente della Figura 484. I COP massimi si osservano, fissata l'ascissa, laddove la frequenza del compressore è minima, sintomo del peso preponderante dei consumi elettrici e indice dell'importanza della presenza dell'inverter. Osservando invece due serie che differiscono per portata dei ventilatori si nota una diminuzione del COP generalizzata al diminuire di questa, dovuta alla diminuzione della potenza termica scambiata alla batteria interna.

Rilievo e analisi dati sperimentali estivi

Per diversi valori della temperatura dell'aria esterna sono state condotte prove al variare della temperatura dell'aria in ingresso all'evaporatore, per la quale non si fissano valori limite o controlli particolari poiché le prestazioni dell'impianto vengono esaminate disgiuntamente da una qualsivoglia applicazione, e facendo variare la frequenza del compressore e la potenza dei ventilatori.

L'indagine sperimentale estiva ha quindi permesso di ottenere 82 punti sperimentali, nelle condizioni operative qui di seguito presentate (tabella 115).

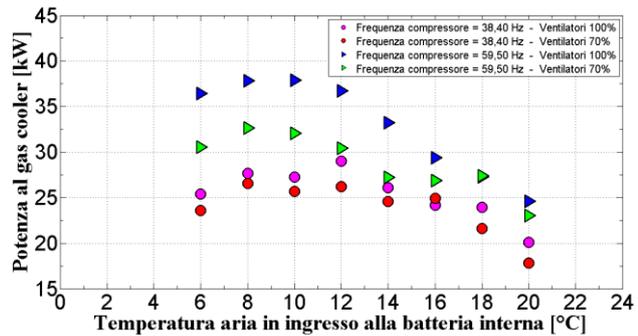


Figura 484. Potenza termica scambiata in funzione della temperatura dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

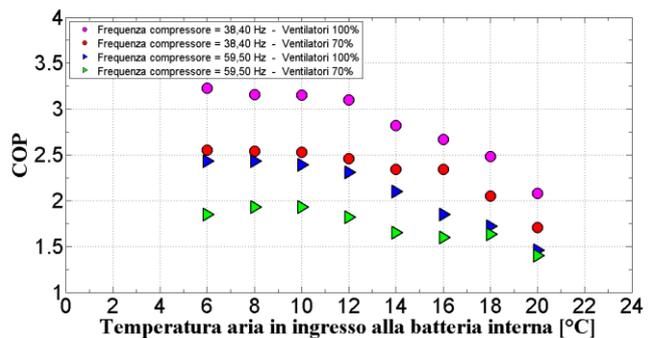


Figura 485. COP in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso del gas-cooler, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

Tabella 115. Condizioni test sperimentale realizzato in estate

Condizioni di test			
T esterna [°C]	T miscela [°C]	Frequenza Compressore [Hz]	Portata Ventilatori [%]
26-34	da 26 a 32	38,40 - 59,50	70 - 100

In Figura 486 si riportano le temperature di mandata dell'aria, misurate a valle dell'evaporatore, in funzione della temperatura dell'aria in ingresso e al variare della frequenza del compressore. La portata volume-trica d'aria varia tra il massimo pari a 5500 m³/h e il 70% di quella massima. Si osserva che all'aumento della frequenza del compressore corrisponde una più bassa temperatura d'uscita dell'aria dall'evaporatore, ciò a causa dell'aumento di capacità termica della CO₂ conseguenza dell'aumento della frequenza di funzionamento. Confrontando invece il funzionamento al variare della portata d'aria si osserva come, per una data condizione di funzionamento della pompa di calore, un aumento della portata d'aria in ingresso comporti un aumento di temperatura della stessa alla mandata, in quanto essendo maggiore la quantità d'aria si ottiene un raffreddamento minore. Vale la pena osservare che, in determinate condizioni, la temperatura d'aria alla mandata risulta essere inadatta alla climatizzazione estiva, sebbene una simile valutazione esuli dagli scopi di questo lavoro.

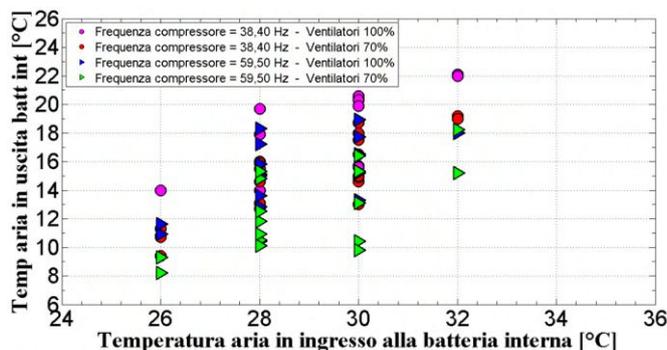


Figura 486. Temperatura di mandata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

In Figura 487 si riportano le potenze frigo scambiate all'evaporatore al variare della frequenza del compressore e al variare della portata d'aria tra il 70% e la massima. Come già evidenziato in precedenza, l'aumento della frequenza e dunque della portata massica di CO₂ elaborata prevale sulla diminuzione della variazione di entalpia, pertanto la potenza termica risulta crescente con la frequenza di funzionamento del compressore, fissata la portata d'aria. All'aumentare della frequenza, invece, aumentano sia la potenza termica scambiata all'evaporatore che la potenza elettrica assorbita a causa dell'aumento di portata massica elaborata. Gli EER massimi (Figura 487) si osservano, fissata l'ascissa, laddove la frequenza del compressore è minima, sintomo del peso preponderante dei consumi elettrici e indice dell'importanza della presenza dell'inverter.

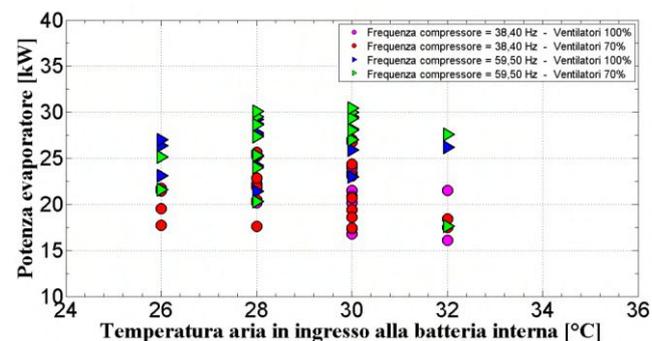


Figura 487. Potenza frigo scambiata in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

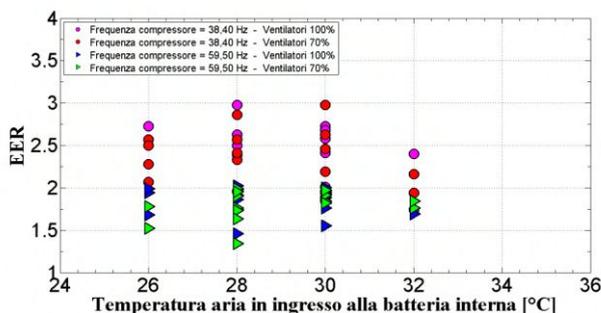


Figura 488. EER in funzione della temperatura di miscela dell'aria all'ingresso dell'evaporatore, al variare della frequenza dell'inverter accoppiato al compressore e della portata del ventilatore

Conclusioni

Nelle sezioni precedenti stati presentati alcuni risultati sperimentali relativi al funzionamento in modalità riscaldamento e raffrescamento di un impianto di condizionamento dell'aria del tipo roof-top a R744 (CO₂). Nel caso invernale la temperatura dell'aria esterna è stata fissata a 6 °C, la temperatura dell'aria all'ingresso del gas-cooler è stata fatta variare tra 6 e 20 °C attraverso un miscelamento tra aria di rinnovo e ricircolata. La portata del ventilatore è stata fatta variare tra il 70% e un massimo di 5500 m³/h. La frequenza dell'inverter che è accoppiato al compressore è stata fatta variare tra 38 e 60 Hz.

Le prestazioni della macchina oggetto di studio sono risultate dipendenti fortemente dai parametri di regolazione, nelle condizioni operative indagate, e comunque sono legate all'architettura d'impianto scelta. In particolare, da un lato si può osservare che il confronto delle prestazioni in termini di COP di tale prototipo con le soluzioni commerciali disponibili sul mercato e operanti con idrofluorocarburi (HFC) è risultato sfavorevole per temperature di ingresso alla batteria interna superiori ai 16 °C e per temperature ambiente simili. Al tempo stesso, i risultati sperimentali hanno mostrato un funzionamento stabile della macchina anche con temperature di ingresso alla batteria interna inferiori ai 10 °C, valori preclusi al funzionamento delle pompe di calore operanti con HFC. Pertanto, questa considerazione, unita al miglioramento delle prestazioni al diminuire della temperatura di ingresso alla batteria interna, ne favorisce l'impiego in situazioni in cui la frazione di aria prelevata dall'esterno debba essere significativa.

Nel caso estivo la temperatura dell'aria esterna è variata tra 26 e 34 °C, la temperatura dell'aria all'ingresso dell'evaporatore è stata fatta variare tra 26 e 32 °C attraverso l'utilizzo di sola aria di rinnovo. La portata del ventilatore è stata fatta variare tra il 70% e un massimo di 5500 m³/h. La frequenza dell'inverter che è accoppiato al compressore è stata fatta variare tra 38 e 60 Hz.

Le prestazioni della macchina oggetto di studio sono risultate anche nel caso estivo fortemente dipendenti dai parametri di regolazione, nelle condizioni operative indagate, e comunque sono legate all'architettura d'impianto scelta. In particolare, si può osservare che le prestazioni della macchina in termini di EER migliorino per valori bassi di temperatura in ingresso all'evaporatore, prestazioni che risultano inferiori rispetto al caso invernale, dove la CO₂ consente un miglior funzionamento della macchina.

Una pompa di calore con queste caratteristiche potrebbe essere abbinata in maniera ottimale a sistemi VAV a tutta aria esterna, a servizio ad esempio di strutture ricettive realizzate in zone climatiche rigide dove il periodo di riscaldamento invernale è preponderante rispetto al periodo di climatizzazione estivo, oppure in situazioni di impiego differenti, laddove la parzializzazione dei ventilatori e della macchina ha un contributo significativo sulle prestazioni.

c.3 Studio di fattibilità per la produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS) in modalità istantanea a mezzo di una pompa di calore a CO₂ (R744) e sviluppo di un sistema di accumulo a forte stratificazione dell'acqua calda prodotta

Recenti studi hanno dimostrato che le prestazioni di una pompa di calore ad anidride carbonica dipendono fortemente dal tipo di applicazione richiesta e dalle condizioni ambientali in cui essa si trova a operare. Per le applicazioni in cui vi è una grande richiesta di acqua calda sanitaria (ospedali, centri sportivi, etc.), o nel caso in cui il rapporto tra la richiesta di acqua calda sanitaria e il riscaldamento è elevato (ad esempio edifici di nuova costruzione a basso consumo energetico con riscaldamento a pavimento), la pompa di calore a CO₂ diviene competitiva rispetto alle pompe di calore tradizionali che utilizzano generalmente refrigeranti alogenati. I sistemi transcritici ad anidride carbonica consentono, infatti, di portare a temperature relativamente alte l'acqua in un flusso in controcorrente con il refrigerante caldo in uscita dal compressore con efficienze dello scambiatore (gas cooler) molto elevate.

D'altra parte, l'efficienza globale della macchina è anche fortemente influenzata dalla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler stesso, per cui è utile abbinare dei sistemi di accumulo a elevata stratificazione alle pompe di calore a CO₂ in modo che tali serbatoi consentano di alimentare la macchina con acqua a temperatura tale da ottimizzare le prestazioni.

Con l'intento di valutare le prestazioni globali della macchina al variare delle condizioni al contorno (temperatura dell'acqua in ingresso gas cooler, portata dell'acqua, temperatura dell'ambiente esterno alla pompa di calore), è stato realizzato un impianto di prova in grado sia di mantenere la temperatura ambiente a un valore desiderato (in un range compreso tra -10 e 20 °C), che di gestire il flusso dell'acqua di alimento della macchina in termini di portata e temperatura (quest'ultima nell'intervallo 15-45 °C).

Lo studio è relativo a campagne sperimentali realizzate inserendo nell'impianto di prova una pompa di calore a CO₂ con scambiatori ad aria (evaporatore) e ad acqua (gas cooler), per la produzione istantanea di acqua calda sanitaria. Le prove sono state eseguite a diverse temperature ambiente variando la portata di acqua in entrata al gas cooler della pompa di calore; è stato possibile inoltre gestire la portata di refrigerante nei limiti di prestazione del compressore intervenendo sui set-point di riferimento della macchina.

Una prima serie di prove è stata condotta mantenendo costanti sia la temperatura ambiente che quella dell'acqua di alimento; successivamente si è proceduto all'esecuzione di prove caratterizzate da temperatura ambiente variabile ed infine sono state eseguite prove variando sia la temperatura ambientale che quella dell'acqua.

La prima serie di prove ha consentito di evidenziare l'influenza delle prestazioni del compressore e del gas cooler sul rendimento globale; la seconda serie di prove ha messo in luce come le condizioni di lavoro all'evaporatore condizionino le prestazioni ed infine, la terza serie di prove ha consentito di quantificare la caduta di prestazioni connessa con un incremento della temperatura dell'acqua di alimento.

I risultati ottenuti mostrano le notevoli potenzialità delle pompe di calore a CO₂ per la produzione istantanea di ACS, coniugando alte prestazioni con consistenti risparmi energetici, ma evidenziano che, per un loro ottimale utilizzo, è necessario abbinarle a sistemi di accumulo ad alta stratificazione in grado di garantire un'ottimale temperatura dell'acqua di alimento.

Pompe di calore ad anidride carbonica

Nel settore della climatizzazione (estiva e invernale) le pompe di calore che utilizzano l'anidride carbonica (R744) si stanno sempre più affermando come sistemi efficienti e pienamente compatibili con le recenti politiche energetiche e di salvaguardia dell'ambiente.

Tra i fluidi cosiddetti naturali l'anidride carbonica rappresenta, infatti, una delle più valide alternative all'utilizzo dei refrigeranti di sintesi attualmente in commercio (principalmente idrofluorocarburi) che, sebbene caratterizzati da ODP (Ozone Depletion Potential) molto bassi o nulli, presentano sovente potenziali di riscaldamento globale (GWP) ancora troppo elevati ai fini dell'effetto serra. La CO₂ è inoltre uno dei pochi fluidi naturali che non è né infiammabile né tossico; è compatibile con i più comuni oli minerali e non agredisce i metalli, né i materiali elastomerici.

Per ciò che concerne invece l'aspetto prettamente energetico, è possibile sfruttare le elevate temperature di compressione e le condizioni di funzionamento al gas cooler realizzate da un ciclo transcritico della CO₂ per ottenere notevoli prestazioni di scambio termico per la produzione di acqua calda sanitaria anche qualora la temperatura dell'ambiente esterno sia molto bassa (fino ai -25 °C).

In Figura 489 è mostrato un esempio dell'ottimo accordo tra i profili di temperatura dell'anidride carbonica ad una pressione di 120 bar (raffreddamento da 100 a 20 °C ca.) e di una portata di acqua da riscaldare in controcorrente a partire da una temperatura di 15 °C fino a 90 °C ca. Nella stessa figura è riportato anche il profilo di temperatura, decisamente meno favorevole, tipico di un condensatore di una pompa di calore con HFC che dovesse compiere la stessa operazione. In questo caso, infatti, le differenze di temperatura tra i fluidi nelle varie sezioni dello scambiatore variano considerevolmente causando perdite exergetiche elevate, conseguenti basse efficienze di scambio termico e temperature dell'acqua in uscita considerevolmente più basse.

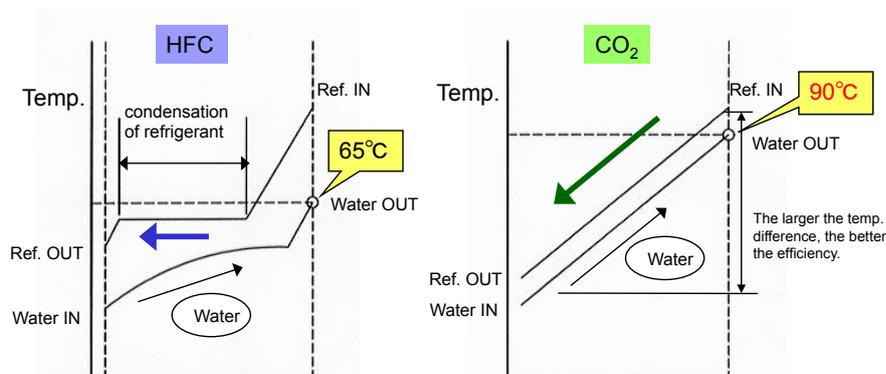


Figura 489. Differenza tra i profili di temperatura in un condensatore a HFC e in un gas cooler a CO₂ in una pompa di calore per il riscaldamento di acqua

Gli elevati livelli di temperatura raggiungibili consentono un abbinamento ottimale con i serbatoi di accumulo a stratificazione (Figura 490). Infatti, le alte temperature consentono di stoccare grandi quantità di energia,

producendo in questo modo l'acqua calda durante le ore notturne, quando sono in vigore tariffe energetiche più vantaggiose.

Per queste caratteristiche e per il fatto che, a temperatura elevata, è naturalmente eliminato l'accumulo batterico (come la legionella, per esempio), l'uso ideale delle pompe di calore a CO₂ può essere indicato in particolare in strutture che consumano una grande quantità di acqua calda, come ristoranti, hotel, mense, lavanderie, centri sportivi, ospedali, etc..

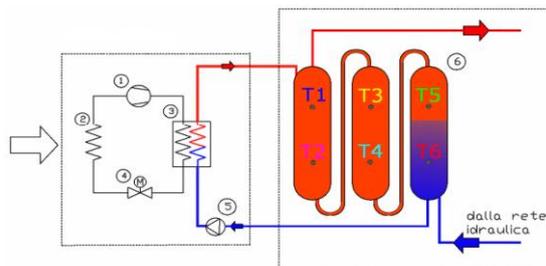


Figura 490. Pompa di calore abbinata ad un sistema di accumulo ad alta stratificazione

Impianto sperimentale e modalità di esecuzione delle prove

Per la campagna sperimentale è stata utilizzata una pompa di calore commerciale ad anidride carbonica da 4,5 kW per la produzione di acqua calda sanitaria. Nel suo impiego standard, l'acqua calda prodotta dall'unità esterna viene stoccata in un serbatoio di accumulo, per poi essere successivamente utilizzata sia ai fini del riscaldamento degli ambienti che per la fornitura su richiesta di acqua calda sanitaria.

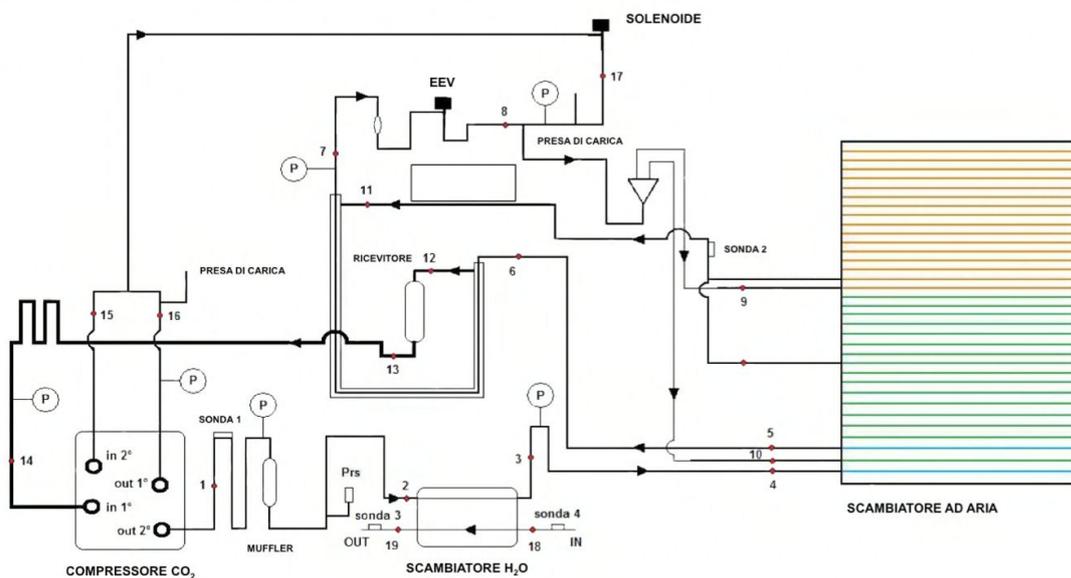


Figura 491. Schema d'impianto della pompa di calore strumentata

La pompa di calore è stata strumentata con termocoppie di tipo K e di tipo J e con misuratori di pressione per monitorare lo stato termodinamico della CO₂ in condizioni di esercizio in corrispondenza (ingresso/uscita) dei principali componenti, evidenziati nello schema d'impianto di Figura 491 e di seguito elencati:

- Compressore bistadio ;
- Silenziatore (Muffler);
- Pressostato (Psr);
- Scambiatore ad acqua (Gas Cooler);
- Valvola elettronica di espansione (EEV);
- Scambiatore ad aria (Evaporatore);
- Ricevitore.

Sono stati inoltre inseriti due misuratori di portata per valutare le portate della CO₂ e dell'acqua di rete nel gas cooler. Il misuratore di portata dell'anidride carbonica è stato inserito all'uscita del secondo stadio del compressore, subito dopo il silenziatore.

Il "cuore" della pompa di calore è senza dubbio l'innovativo compressore rotativo bistadio a CO₂, realizzato da Sanyo con una tecnologia che ancora oggi rappresenta un'esclusiva mondiale nel campo della progettazione dei compressori per CO₂. Il compressore rotativo bistadio resiste a elevate differenze di pressione di lavoro, è estremamente affidabile grazie alla dispersione del carico, è soggetto solo minimamente a perdite ed è

caratterizzato da bassi livelli di vibrazioni. Il funzionamento presenta ridotti livelli di rumore e grazie al suo design compatto e leggero consente una sostanziale riduzione degli ingombri e del peso della pompa di calore.

Lo scambiatore ad acqua è del tipo tubo in tubo e presenta anch'esso delle soluzioni realizzative particolari sviluppate ad hoc da Sanyo, che garantiscono incrementi in termini di efficienza dello scambio termico stimati nell'ordine del 60% rispetto alle soluzioni più tradizionali.

L'evaporatore è uno scambiatore ad aria a pacco alettato accoppiato a una ventola assiale a pale per lo scambio termico in regime di convezione forzata tra fluido di lavoro e aria. Particolari accorgimenti nella progettazione del circuito frigorifero consentono di realizzare un efficace sistema di protezione antigelo per le zone inferiori dello scambiatore, evitando così l'utilizzo di riscaldatori elettrici ovvero di dover ricorrere all'inversione del ciclo.

La modalità d'esecuzione delle prove ha previsto, dopo il transitorio iniziale, il raggiungimento e il mantenimento di condizioni stazionarie di funzionamento della pompa di calore come evidenziato dal grafico in Figura 492.

Risultati sperimentali

L'analisi dei dati sperimentali ha inteso valutare le prestazioni complessive della macchina e gli effetti delle diverse condizioni al contorno sulle efficienze di funzionamento dei singoli componenti, in particolare del gas cooler e del compressore; per ciascuna prova sono presentate le correlazioni tra i parametri caratteristici mediati sui periodi di funzionamento stazionari della pompa di calore.

Per ciò che concerne le prestazioni del compressore, i risultati sperimentali hanno mostrato che l'unità installata sulla pompa di calore in prova garantisce prestazioni elevate in ogni condizione di funzionamento. La Figura 493 riporta l'efficienza globale del compressore, definita secondo la relazione seguente, in funzione del rapporto tra le pressioni estreme di lavoro β :

$$\eta_g = [G_{CO2} \cdot (h_{outCPis} - h_{inCP})] / W_{el}$$

dove G_{CO2} è la portata di anidride carbonica, $h_{outCPis}$ è l'entalpia in uscita compressore valutata con la condizione di isentropicità rispetto all'ingresso, h_{inCP} è l'entalpia in ingresso e W_{el} la potenza elettrica assorbita dal compressore. Si può notare come il rendimento si attesti su valori compresi tra 0,67 e 0,75, rimanendo ampiamente accettabile anche con condizioni al contorno sfavorevoli (temperature ambiente molto basse).

Per quanto riguarda l'analisi delle prestazioni degli altri componenti, il totale dei test sperimentali è stato ripartito in tre gruppi: il primo riguarda le prove effettuate in assenza del box di condizionamento, con temperatura dell'aria all'evaporatore costante e pari a 19 °C e temperatura dell'acqua di alimentazione costante a 16 °C; il secondo gruppo comprende i test eseguiti con la pompa di calore all'interno del box (T_{amb} compresa nell'intervallo -9÷14 °C) e temperatura dell'acqua ancora fissata a 16 °C. Nella terza serie di prove sono state variate sia la temperatura dell'aria all'evaporatore che quella dell'acqua di alimento.

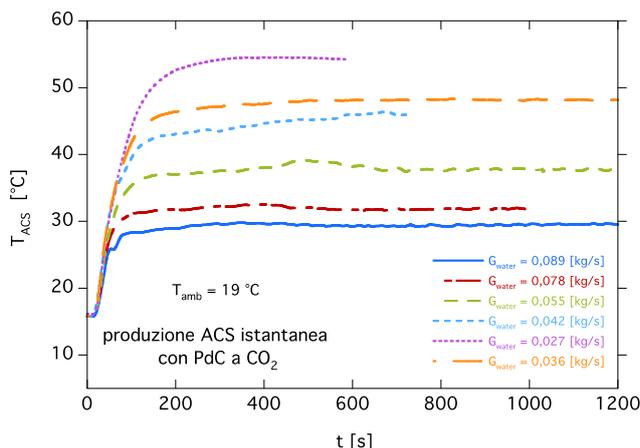


Figura 492. Andamento nel tempo della temperatura dell'acqua in uscita della PdC al variare della portata

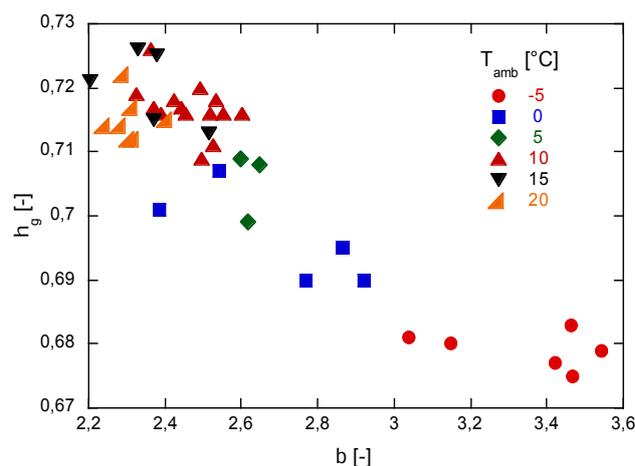


Figura 493. Rendimento globale del compressore η_g in funzione del rapporto di compressione

Test con temperatura dell'aria e dell'acqua ingresso gas cooler costanti

Le prove sono state effettuate variando la portata di acqua di rete in entrata al gas cooler della macchina, G_{water} , e cercando di operare nelle medesime condizioni di temperatura ambiente ($T_{amb} \approx 19 \text{ }^\circ\text{C}$) e di portata di refrigerante. Per questa serie di prove si possono assumere sostanzialmente costanti le condizioni di lavoro all'evaporatore.

Sono riportati in Figura 494 i grafici relativi ai dati sperimentali ottenuti in termini di temperatura d'uscita dell'acqua T_{ACS} e delle relative prestazioni, in termini di COP, della pompa di calore. La Figura 494a mostra le temperature raggiunte dall'acqua in uscita dal gas cooler in funzione della portata di acqua trattata. Come atteso, la temperatura decresce all'aumentare della portata di acqua. Si nota una certa influenza della pressione superiore del ciclo sulla temperatura ottenuta a parità di portata (ad esempio 130 kg/h).

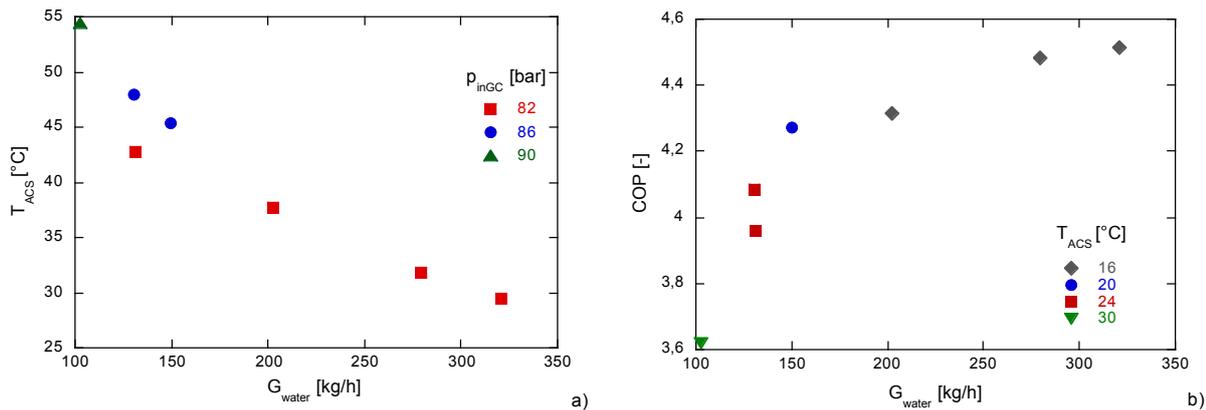


Figura 494. Temperatura dell'acqua in uscita dalla PdC al variare della portata erogata (a); COP della PdC in funzione della portata erogata (b)

Per ciò che concerne le prestazioni della macchina (Figura 494b), il COP cresce con la portata, fino a valori intorno a 4,5, con un incremento globale di circa il 25%.

I valori più bassi di COP misurati sono da ascrivere principalmente alla diminuita efficienza del gas cooler in corrispondenza di minori portate d'acqua trattata (Figura 495a).

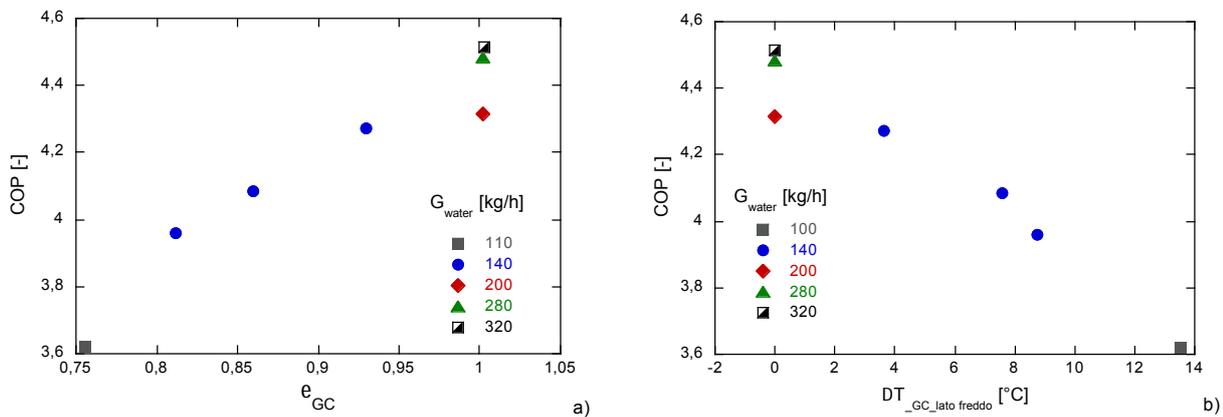


Figura 495. COP della PdC in funzione dell'efficienza del gas cooler (a); COP della PdC in funzione del ΔT sul lato freddo del gas cooler (b)

L'efficienza (ϵ) di uno scambiatore di calore indica la potenza scambiata in uno scambiatore rispetto alla massima possibile. Quest'ultima, in accordo con il II principio della termodinamica, è ottenuta quando la temperatura di uscita del fluido con la capacità termica oraria minore C ($C = mc_p$) raggiunge quella d'ingresso dell'altro fluido, eventualità che si verifica solo con uno scambiatore in controcorrente di dimensioni (praticamente) infinite; nelle nostre condizioni di prova, il fluido con capacità termica minore è sempre l'anidride carbonica e il calcolo dell'efficienza si riduce alla:

$$\epsilon_{GC} = (T_{inGC} - T_{outGC}) / (T_{inGC} - T_{water})$$

La Figura 495a mostra come, con portate di acqua minori di 200 kg/h, l'efficienza decresce con la portata; per portate superiori a 200 kg/h l'efficienza approssima la massima possibile e il COP aumenta (a parità di efficienza) con la portata d'acqua.

La riduzione di efficienza dello scambiatore implica che la temperatura d'uscita della CO₂ nel gas cooler tende ad aumentare al decrescere della portata. La Figura 495b mostra proprio questo effetto: ad esempio, per una portata di 100 kg/h, la differenza di temperatura tra CO₂ in uscita e acqua in entrata è dell'ordine di 14 °C, mentre per portate maggiori la differenza in questione è praticamente nulla (efficienza prossima all'unità). La motivazione termodinamica della riduzione di efficienza dello scambiatore al variare della portata di acqua trattata può essere spiegata confrontando i grafici in Figure 496.

Ipotizzando di disporre di uno scambiatore in controcorrente puro, le linee rosse rappresentano l'andamento della temperatura della CO₂ in ogni sezione dello scambiatore, mentre le blu rappresentano i livelli di temperatura dell'acqua nelle stesse sezioni (per comodità, anche se impropriamente, mostrati sul diagramma T-S della CO₂).

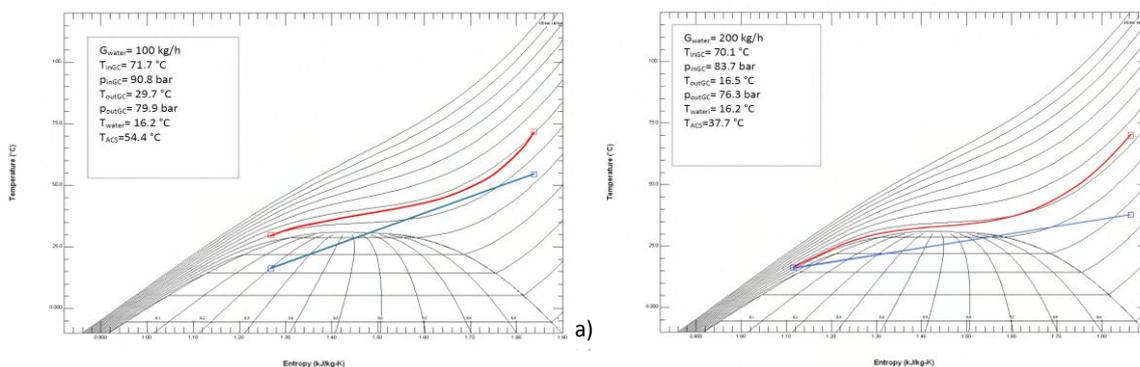


Figura 496. Profili di temperatura qualitativi al gas cooler con G_{water} 100 e 200 kg/h

Quando la portata d'acqua è minore, i ratei di crescita della temperatura sono maggiori (pendenza della linea blu in Figura 496a maggiore di quella corrispondente in Figura 496b). Ciò determina un "pinch" di temperatura all'interno dello scambiatore molto minore rispetto all'estremità, rendendo quindi impossibile ottenere una differenza di temperatura piccola all'uscita (efficienza peggiore). Le due figure evidenziano anche le perdite di carico, dell'ordine dei 7-10 bar, che si verificano nello scambiatore testato: ovviamente la presenza di perdite di carico così accentuate acuisce la problematica relativa all'eccessivo "avvicinamento" dei profili di temperatura all'interno dello scambiatore.

Test con temperatura ambiente variabile e acqua di alimento costante

La Figura 497a mostra i livelli di temperatura raggiunti in funzione delle portate di acqua elaborate. Con la macchina testata si ottengono temperature prossime ai 50 °C con portate dell'ordine di 100 ÷ 150 kg/h (0,028 ÷ 0,036 L/s). Per queste portate si ottengono efficienze al gas cooler ridotte, anche del 25%, rispetto all'ottimale, come desumibile dalla Figura 497b.

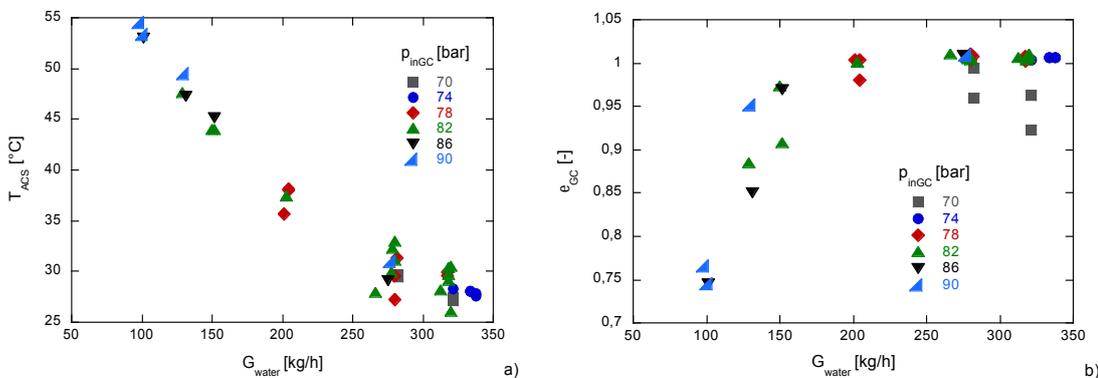


Figura 497. Temperatura dell'acqua in uscita dalla PdC al variare della portata erogata (a); efficienza del gas cooler in funzione della portata di acqua elaborata (b)

La Figura 497b mostra anche come l'efficienza, a parità di portata, sia funzione della pressione del gas cooler: questo avviene quando le pressioni di esercizio al gas cooler sono eccessivamente basse per un effetto

termodinamico analogo a quello esposto in riferimento alla Figura 496 e già riportato in letteratura³⁸. Rimane quindi confermata la notevole influenza della pressione superiore del ciclo sulla definizione del set di parametri ottimali per l'utilizzo delle pompe di calore a CO₂³⁹.

La Figura 498a mostra la netta dipendenza del COP sia da \dot{G}_{H_2O} che da T_{amb} . Con portate basse il decremento di COP è da addebitare anche alla già mostrata riduzione di efficienza di scambio termico nel gas cooler. Con portate maggiori di 200 kg/h, a parte le situazioni di bassa pressione corrispondenti a condizioni di efficienza non unitaria, il decremento di COP può essere attribuito alla condizione di lavoro dell'evaporatore.

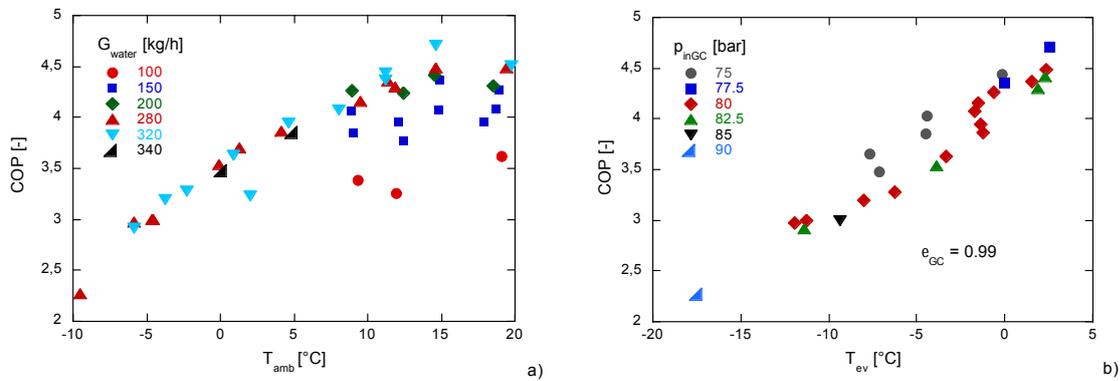


Figura 498. COP della PdC in funzione della temperatura ambiente (a); COP della PdC in funzione della temperatura di evaporazione

La figura 498b mostra proprio come il COP sia sostanzialmente proporzionale alla temperatura di evaporazione nelle situazioni caratterizzate da efficienze del gas cooler elevate: questo avviene perché la temperatura di evaporazione, T_{ev} , e la corrispondente pressione di evaporazione, p_{ev} , diminuiscono al decrescere della temperatura ambiente con conseguente aumento del β e peggioramento delle prestazioni globali del compressore (Figura 493).

Test con temperatura ambiente e acqua di alimento gas cooler variabile

Questa serie di prove ha consentito di quantificare l'impatto della variazione della temperatura dell'acqua in ingresso gas cooler sulle prestazioni della macchina. Le Figure 499a e b mostrano come un incremento di questa produca una considerevole riduzione del COP ottenuto, che raggiunge valori leggermente inferiori all'unità quando la temperatura dell'acqua arriva a 45°C. L'effetto delle variazioni della temperatura ambiente e della portata di acqua sembra essere poco significativo soprattutto quando la temperatura dell'acqua raggiunge e supera i 35°C.

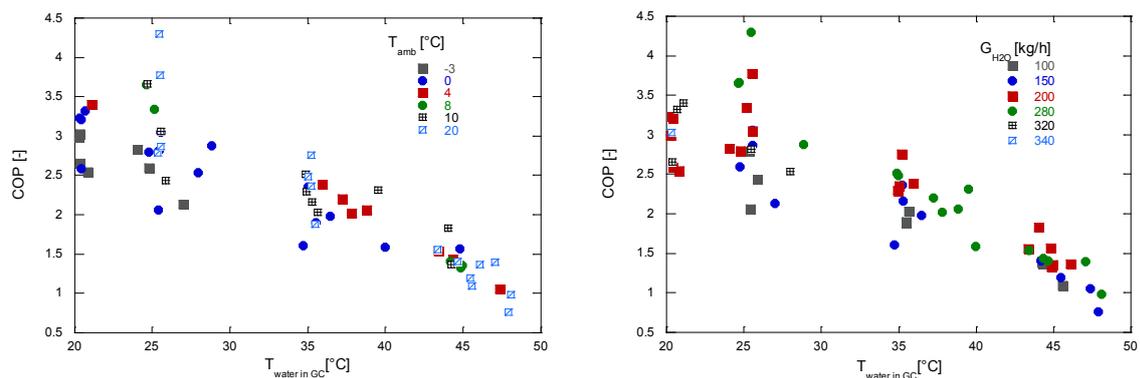


Figura 499. COP della PdC in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso gas cooler-parametro T_{amb} (a); COP della PdC in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso gas cooler-parametro \dot{G}_{H_2O} (b)

³⁸ Neksa P., 25 (2002), 421-427

³⁹ Lorentzen G., International Journal of Refrigeration, 17 (1994), 5, pp. 292-301

Kim M., Pettersen J., Bullard C. W., Progress in Energy and Combustion Science, 30 (2004), 2, 119-174

Casson V., Cecchinato L., Corradi M., Fornasieri E., Girotto S., Minetto S., Zamboni L., Zilio C., International Journal of Refrigeration, 26 (2003), 926-935

A questo proposito, la Figura 500 consente di apprezzare come, per elevate temperature dell'acqua in ingresso gas cooler, non vi siano sostanziali variazioni di COP al crescere della temperatura ambiente, mentre al ridursi della temperatura dell'acqua (per esempio quando questa è dell'ordine di 20-24°C), il COP aumenta con la temperatura dell'ambiente, in accordo con quanto già mostrato in Figura 499a (che mostra prove realizzate con temperatura dell'acqua al gas cooler di 16°C).

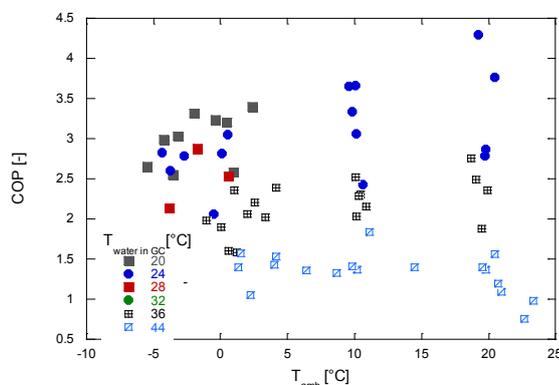


Figura 500. COP della PdC in funzione della temperatura ambiente - parametro temperatura dell'acqua in ingresso gas cooler

Conclusioni

La campagna di prove condotta sull'impianto sperimentale ha avuto come scopo una prima valutazione sulla possibilità di produrre ACS in modalità istantanea a mezzo di una pompa di calore a CO₂. Pur essendo la macchina testata di potenzialità piuttosto bassa (4.5 kW termici) e quindi non in grado di produrre il quantitativo di acqua calda sanitaria richiesto dalle vigenti normative (UNI 9182:2010), le prove sperimentali hanno consentito di evidenziare i seguenti aspetti:

- il processo di compressione della CO₂ può essere condotto con efficienze elevate grazie all'utilizzo di compressori bistadio di ultima generazione;
- un altro componente importante per l'ottenimento di COP elevati è il gas cooler. Fissate la portata di ACS da produrre e la sua temperatura finale, deve essere correttamente valutata la pressione di lavoro della CO₂ per ottenere efficienze elevate di scambio termico; a tale scopo è fondamentale progettare uno scambiatore che consenta perdite di carico il più possibile ridotte, oltre a garantire alte prestazioni di scambio;
- da quanto sopra esposto, e in linea generale, segue l'importanza del sistema di controllo e gestione della macchina (ad esempio, per ottimizzare tramite l'inverter del compressore la pressione al gas cooler al variare delle condizioni al contorno);
- la necessità di disporre di un evaporatore il più possibile efficiente per migliorare le condizioni di lavoro del compressore.

In conclusione, il presente lavoro, nonostante i noti limiti di potenza della macchina testata, ha dimostrato l'esistenza di buone prospettive per lo sviluppo di pompe di calore a CO₂ dedicate alla produzione istantanea di ACS, in particolare quando queste siano abbinate a sistemi di accumulo ad alta stratificazione.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Per lo sviluppo delle attività del progetto, l'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni che hanno dato al lavoro svolto un importante contributo tecnico e scientifico: Di seguito si riporta una breve descrizione dei lavori eseguiti dai diversi partner.

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Università di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali

Le attività del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali coprono le aree della conoscenza nell'ingegneria industriale e in quella economico-gestionale al fine di sviluppare nuovi prodotti, materiali e processi produttivi e organizzativi. L'Università di Padova ha portato avanti l'analisi sperimentale di "Accumuli

termici a cambiamento di fase integrati in impianti di solar heating and cooling". L'attività di ricerca inerente la Subtask a.1 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Padova. Il rilievo e l'analisi dei dati sperimentali di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling installato a servizio dell'Edificio F92 è stata effettuata da ENEA (comparazione dati sperimentali anno 2012 - anno 2013); l'Università di Padova si è concentrata sull'analisi delle prestazioni del serbatoio di accumulo termico del tipo a cambiamento di fase, installato sempre a servizio del medesimo impianto.

Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria.

Presso l'Università del Sannio sono in corso attività di ricerca relative alla determinazione dei consumi energetici di sistemi utenza - impianto attraverso simulazioni numeriche. In particolare, presso il Dipartimento di Ingegneria il gruppo di ricerca di Fisica tecnica si occupa anche della modellazione e simulazione di sistemi dedicati alla climatizzazione e del loro accoppiamento con l'edificio, in funzione delle condizioni climatiche, della natura dell'edificio e del sistema di climatizzazione. L'Università del Sannio ha portato avanti lo "Sviluppo di logiche di regolazione progettate ad hoc per impianti di solar heating and cooling e per impianti a pompa di calore a compressione". L'attività di ricerca inerente la Subtask a.3 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università del Sannio. ENEA si è occupata dello sviluppo, della programmazione e del test di logiche di regolazione avanzate progettate a servizio dell'impianto di solar heating and cooling che climatizza l'edificio F92, e dell'impianto a pompa di calore aria-aria realizzato a servizio dell'edificio F-76 (i due edifici sono entrambi presenti all'interno del C.R. ENEA di Casaccia); l'Università del Sannio ha curato l'analisi energetica comparativa delle differenti logiche di regolazione, sviluppando modelli in TRNSYS degli impianti sperimentali ENEA e validandoli con i dati sperimentali forniti da ENEA.

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici

Attività del Dipartimento è quella di "organizzare e promuovere ricerche finalizzate alla produzione ed alla gestione delle fonti di energia e delle risorse energetiche ed ambientali, alla implicazione di esse nel rapporto uomo-ambiente ed alla conoscenza di fondamentali proprietà fisiche delle materie utili per le applicazioni nel campo energetico, astrofisico e spaziale". Il Dipartimento ha portato avanti, le attività di "Analisi di sensibilità di impianti di climatizzazione innovativi (solar heating and cooling) ed individuazione dell'effettiva fattibilità economica rispetto a soluzioni di tipo tradizionale". L'Università di Palermo ha inoltre partecipato alle attività dei gruppi di lavoro IEA, seguendo in particolare le Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration" e Task 48 "Quality assurance and support measures for Solar Cooling". L'attività di ricerca inerente la Subtask a.4 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Palermo. ENEA ha curato l'acquisizione e quindi l'elaborazione dei dati sperimentali di funzionamento dell'impianto di solar heating and cooling edificio F92 presente presso il C.R. ENEA di Casaccia, al fine di ottenere modelli di simulazione dinamica validati (accettando margini d'errore inferiori al 10% rispetto ai dati misurati e quelli ottenuti dalle simulazioni) che sono stati poi utilizzati per le analisi tecnico-economiche sviluppate sui differenti sistemi di climatizzazione; l'Università di Palermo ha curato l'analisi di sensibilità per i vari componenti costituenti gli impianti di solar heating and cooling, sviluppando un modello in TRNSYS del sistema edificio-impianto inerente l'edificio F92 e simulando il comportamento dell'impianto al variare della taglia e della località di installazione.

Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica, Energetica e Gestionale

Le attività del Dipartimento coprono diversi settori di ricerca nel campo della Fisica Tecnica, della Tecnologia e sistemi di lavorazione, della Meccanica applicata e bioingegneria, di Costruzione di Macchine, di Disegno e metodo dell'Ingegneria Industriale, di Impianti Industriali Meccanici e di Macchine e Sistemi Energetici. L'Università della Calabria ha portato avanti le attività di "Analisi di sensibilità di impianti di climatizzazione innovativi (pompe di calore) ed individuazione dell'effettiva fattibilità economica rispetto a soluzioni di tipo tradizionale". L'attività di ricerca inerente la Subtask a.4 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università. ENEA ha curato l'acquisizione e quindi l'elaborazione dei dati sperimentali di funzionamento delle pompe di calore ad R744 (curve di funzionamento invernale ed estivo), al fine di parametrizzare l'andamento del COP in funzione della temperatura dell'aria esterna e della temperatura di uscita dell'acqua e di conoscere la curva della potenza termica erogata al variare delle due temperature precedenti; l'Università della Calabria ha curato l'analisi di sensibilità per i vari componenti costituenti gli impianti a pompa di calore (sia di tipo commerciale che sperimentali ad R744), sviluppando un modello in TRNSYS del sistema edificio-impianto inerente l'edificio F92 e simulando il comportamento dell'impianto a pompa di calore al variare della taglia e della località di installazione.

b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura**Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale**

Presso l'Università di Padova sono in corso attività di ricerca nel campo dell'energia solare, ed in particolare per la caratterizzazione di dispositivi per la conversione di energia solare in calore. Il Laboratorio di Conversione di Energia Solare, presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università, ha portato avanti, in collaborazione con ENEA, le attività di "Ricerca teorico-sperimentale su ricevitori solari a mini/microcanali ed analisi delle potenzialità di applicazione di tecnologie PVT a concentrazione".

c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione**Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale**

Le attività del Dipartimento sono iniziate nel 1989, per iniziativa di docenti caratterizzati da una notevole omogeneità di interessi culturali. Nell'ambito dell'Università di Napoli Federico II, il Dipartimento raccoglie e coordina l'attività di ricerca di docenti e ricercatori che operano a livello scientifico nei settori disciplinari Fisica Tecnica Ambientale, Fisica Tecnica Industriale e Fluidodinamica. L'Università di Napoli Federico II ha portato avanti la "Progettazione di due banchi prova strumentati per test su componenti di impianti a compressione di vapore con fluidi HFC e HFO".

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Il progetto si propone di contribuire mediante studi e sperimentazioni allo sviluppo di nuovi prodotti, hardware e software, che, nell'ambito della mobilità elettrica, possano essere utilizzati per migliorarne l'efficienza energetica complessiva e più in generale le interazioni con il sistema elettrico, integrandosi in modo competitivo nel contesto delle filiere e dei sistemi produttivi esistenti.

Tra i maggiori risparmi di energia ottenibili per i veicoli elettrici e per gli ibridi "plug-in" vi sono quelli legati alla ricarica delle batterie, sia direttamente grazie al miglioramento dei rendimenti (anche durante la frenata rigenerativa) che indirettamente, per la riduzione dei consumi conseguente alla riduzione del peso della batteria resa possibile dalla "fast charge". Infatti il peso (ed il costo) della batteria diminuiscono in proporzione alla riduzione dell'autonomia, e questo diventa accettabile se il tempo di ricarica, con infrastrutture di rifornimento adeguate, si riduce a qualche minuto (ricarica parziale). Inoltre, nel caso di tecnologie in piena evoluzione come la ricarica rapida e quella "contactless", l'efficienza di conversione dell'energia elettrica può senz'altro aumentare.

Lo sviluppo delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici su gomma offre anche positive possibilità di interazione verso la rete elettrica. Con riferimento agli ambiti applicativi "smart grid" e "smart cities", l'impiego di stazioni di ricarica (e/o degli accumuli elettrici dei veicoli in sosta), può essere utilmente associato alla generazione distribuita, in quanto l'accumulo elettrico distribuito ha tempi di reazione estremamente brevi. Manca però una conoscenza approfondita delle possibilità di interazione lato "domanda di energia per la mobilità elettrica".

Ulteriori risparmi sono infine correlati all'integrazione di nuovi materiali, architetture e processi produttivi per l'alleggerimento strutturale nei vettori collettivi di tipo ferroviario, tramviario ed affini, in quanto questo settore è meno dinamico rispetto al settore "automotive" dove la maggiore concorrenza e le stringenti normative antinquinamento hanno già portato all'introduzione di nuovi materiali e tecnologie, anche grazie all'aiuto dei grandi numeri ed alla maggiore automazione di processo possibile in tale settore. Il collegamento diretto alla rete elettrica induce infatti nella visione collettiva a considerare meno prioritario l'alleggerimento dei grandi vettori per il trasporto su rotaia in quanto apparentemente puliti (non inquinanti), tuttavia la riduzione di peso di questi grandi vettori si traduce immediatamente in una riduzione di energia dalla rete, con conseguenti positive ricadute economiche e sociali.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le linee di ricerca nel progetto sviluppate sono rivolte a studi ed applicazioni relative al settore dei nuovi materiali e dei componenti innovativi per il risparmio energetico nel settore dei trasporti:

- una prima linea di ricerca è rivolta allo sviluppo di sistemi e componenti innovativi per l'incremento dell'efficienza elettrica delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali collegate alla rete elettrica, con un particolare accento sui sistemi di ricarica rapida;
- la seconda linea di ricerca è rivolta all'ottimizzazione delle interazioni tra veicoli elettrici (merci e passeggeri, TPL e trasporto privato) e reti di distribuzioni dell'energia ("Vehicle-To-Grid") con particolare riguardo alla domanda di energia (analisi dell'uso del mezzo elettrico);
- la terza linea di ricerca è dedicata allo sviluppo di metodologie di progettazione, realizzazione ed assemblaggio di materiali e strutture leggere e riciclabili, per alleggerire i componenti strutturali di metropolitane e treni (sia il *Body in white* sia componenti dello chassis dei vettori per il trasporto) e per migliorare, al tempo stesso, le caratteristiche inerenti la protezione dei passeggeri in caso di incidente la protezione dei passeggeri in caso di incidente.

La prima linea di attività è comprende tre distinte azioni che coprono settori contigui di interesse nelle operazioni di alimentazione dei veicoli elettrici o di ricarica dei sistemi di accumulo elettrici in dotazione ai veicoli elettrici. Scendendo nello specifico le attività espletate hanno riguardato:

- Studio sulla ricarica "contactless" per l'analisi e la progettazione di un sistema di trasferimento dell'energia senza contatto al fine di poter realizzare un accoppiamento elettromagnetico di elevato rendimento tra

veicolo e rete di alimentazione pur in presenza di elevati gap tra bobina primaria e secondaria anche in condizioni dinamiche .

In quest'ambito sono state definite le specifiche per realizzare un prototipo di caricabatterie "reversibile" ossia di un sistema che possa svolgere sia le funzioni di caricabatterie che di azionamento. A valle della definizione delle specifiche si è curata la progettazione del sistema e la sua realizzazione in forma prototipale. A completamento sono state eseguite prove di funzionalità del sistema.

- Realizzazione di un sistema per la determinazione delle prestazioni energetiche e di power quality dei sistemi di conversione da utilizzare nelle applicazioni inerenti l'elettromobilità. Il sistema per le specifiche caratteristiche è idoneo alla sua applicazione in ambienti ove le caratteristiche elettriche possono subire variazioni rapide addebitabili sia al sistema di accoppiamento della potenza che alle diverse condizioni del carico. Di seguito si è esperita la valutazione del sistema di misura mediante esecuzione di prove su una stazione di ricarica rapida con la determinazione del comportamento energetico della medesima. Inoltre si è eseguita la sperimentazione di una stazione di ricarica rapida accoppiata ad un compensatore statico per la valutazione degli effetti sulla rete in BT, mediante espletamento di prove atte alla rilevazione dell'influenza sulla rete di distribuzione in BT .
- Partecipazione ad alcune iniziative internazionali per lo scambio continuo sulle attività programmatiche e di orientamento a livello nazionale sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è stata funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in corrente alternata ed in corrente continua

Nello sviluppo di sistemi e componenti innovativi per le strutture di alimentazione dei veicoli elettrici stradali collegate alla rete elettrica, un particolare accento si pone oggi su i sistemi di ricarica "di elevata potenza" distribuiti sul territorio. Se si punta a un uso esteso dei veicoli elettrici, è infatti necessario prevedere delle stazioni di rifornimento distribuite sul territorio, nelle quali l'utente possa caricare la batteria del veicolo in tempi contenuti. Per l'elettrificazione dei trasporti pubblici locali, invece, la ricarica rapida, o di potenza elevata, apre prospettive molto interessanti di riduzione dell'accumulo elettrico, favorendo la diffusione di questi mezzi grazie ai minori costi, sia diretti (acquisto) che indiretti. Infatti in un autobus i consumi sono dovuti prevalentemente alla componente di rotolamento ed a quella d'inerzia e con un minore peso a vuoto il consumo energetico diminuisce quasi proporzionalmente.

Un sistema di ricarica per veicoli a trazione prevalentemente (PHEV) o esclusivamente elettrica (BEV) può essere di diversi tipi, ma le scelte tecnologiche principali sono sostanzialmente due. La prima riguarda la collocazione del convertitore, ovvero a bordo del veicolo o fisso, nella colonnina di carica. Il secondo aspetto riguarda il tipo di conversione finale, direttamente AC/DC o DC/DC con precedente conversione AC/DC. Quest'ultima soluzione è stata finora utilizzata solo nel caso di mezzi per il trasporto pubblico locale con ricarica veloce e distribuita alle fermate, come nel caso dell'autobus cinese Capabus (Aowei Technology Development Company & Sinautec, Shanghai), con accumulo elettrico su supercondensatori, derivato da un filobus e del prototipo italiano ZeroFilo-Bus sviluppato da BredaMenarinibus nell'ambito del Progetto PBI (Piattaforma Bus Innovativi) di Industria 2015 con il concorso dell'ENEA, Elettronica Santerno e dell'Università di Pisa. Entrambi i mezzi, quindi, si ricaricano in c.c. alla tensione tramviaria e modulano la corrente in batteria con un convertitore DC/DC "on board".

Una distinzione operativa, invece, è tra ricarica rapida (1 ora) o ultrarapida (<1 ora) e quella lenta. Per la ricarica lenta, ad esempio notturna oppure in un parcheggio di interscambio, sono universalmente diffusi convertitori AC/DC alloggiati a bordo del veicolo ed alimentati in monofase alla tensione di rete. In tal caso, la potenza che esso deve gestire è limitata a qualche kW e pertanto il peso e l'ingombro sono piuttosto contenuti. Molto interessanti, a questo riguardo, sono i sistemi "contactless", che sono proposti, con potenze elevate, per il trasporto pubblico locale, ma dei quali si prevede un'ampia diffusione, con sistemi di potenza ridotta (fino a 7-8 kW), nel trasporto individuale. Secondo Toyota solo la ricarica induttiva infatti dà un senso ai PHEV, la diffusione dei quali si prevede in forte crescita in Europa (secondo Volkswagen, 300.000 mezzi entro il 2018), ed è quindi prevista la messa sul mercato di una versione della Prius "Plug-in" provvista di ricarica induttiva.



Figura 501. Colonnina ENEL "Fast recharge" da 43 kW e Renault ZOE

Per la carica rapida o ultrarapida, è invece necessario un convertitore controllato AC/DC di potenza maggiore, che può essere a bordo mezzo o a terra. Nel primo caso si ricarica in c.a. e la potenza del caricabatteria di bordo deve avvicinarsi a quella della colonnina (ad esempio colonnina ENEL "Fast recharge" da 43 kW, alimentazione al veicolo in trifase a 64 A, Figura 501). Attualmente l'offerta di autovetture con tali caricabatterie è limitata ad alcuni modelli, (ZOE, 43 kW, E-Smart, 22 kW, Nissan Leaf, 9 kW), e, tenendo conto che la capacità del pacco batterie per una vettura media varia tra i 18 ed i 24 kWh, solo la ZOE è al momento in grado di ricaricarsi completamente in 30 minuti.

Una soluzione tecnica molto interessante è quella di utilizzare, per la carica delle batterie, l'elettronica di potenza già presente a bordo per il normale funzionamento del veicolo. Tale

soluzione è quella sviluppata nella scorsa annualità dall'Università di Padova e realizzata nella presente annualità (Subtask a1)

In alternativa si ipotizza direttamente il cambio del pacco batterie dell'autoveicolo, ad esempio la Renault propone un sistema automatizzato del cambio del pacco batterie, chiamato QuickDrop®, che permette di effettuare l'operazione in circa tre minuti e che sarà utilizzato sui veicoli elettrici di prossima commercializzazione. Questo sistema presenta alcuni aspetti critici. In particolare, necessita di una standardizzazione molto spinta del pacco batterie, sia dal punto di vista delle dimensioni sia per quanto riguarda la tensione nominale e la capacità.

Le diverse modalità di ricarica sono rappresentate in Figura 502 nel caso di un autobus. In questo caso la colonnina CHAdeMO, che consente la ricarica veloce di un'autovettura con una batteria da 25 kWh, nel caso di un autobus con una batteria da 150 kWh è adatta solo per la ricarica lenta.



Figura 502. Tipi di ricarica per il trasporto collettivo

In questo caso, dove cioè la missione del veicolo è ben definita, la possibilità di ricaricarsi a potenze elevate, e.g. 150-200 kW e ad intervalli ravvicinati, ad esempio al capolinea come nel caso del Gyrobus illustrato in figura, consente di ridurre di 3-4 volte la dimensione del pacco batteria. Ad esempio, se la batteria è in grado di ricaricarsi completamente in 1/2 ora, se accetta cioè una corrente 2C (dove C è la sua capacità nominale in Ah), in 5 min (la durata tipica della sosta al capolinea) potrà ricaricarsi di 1/6 della sua capacità totale. E

se la lunghezza della tratta AR è x chilometri, ricaricarsi di 1/6 al capolinea significa che la capacità totale della batteria dovrà essere 6 volte quella necessaria a percorrere x chilometri. Per cui, se x è pari ad 8 km, la batteria dovrà essere dimensionata per una autonomia di una cinquantina di chilometri, e non per i 150-200 km oggi richiesti ad un autobus. Il tema è esaminato e discusso nell'ambito dell'Obiettivo b.

In ogni caso, sia che il caricabatteria sia a terra o a bordo, data la potenza e la variabilità del carico, un impianto che preveda più punti di ricarica di potenza elevata deve essere alimentato in MT tramite un trasformatore da 1,6 o 2 MVA che, per quanto detto, potrebbe funzionare molte ore a basso carico e quindi in modo non ottimale dal punto di vista dell'efficienza. Il costo di installazione dell'intero impianto risulta inoltre essere elevato perché dipende dalla potenza di picco e non dalla potenza media. L'utilizzo di un accumulo stazionario può ridurre considerevolmente la potenza richiesta, oltre a svolgere (se bidirezionale) anche un servizio per la rete.

Tanto dal punto di vista delle tecnologie che da quello delle normative, si tratta perciò di tecnologie in fase di evoluzione, dove le scelte principali non sono ancora congelate, e che richiedono quindi la sperimentazione ed il confronto tra le soluzioni. Una definizione più accurata degli ambiti di convenienza delle diverse tecnologie non è quindi ancora possibile, essendo entrambe in corso di sviluppo, e l'obiettivo più generale delle attività è proprio quello di concorrere a definire gli elementi mancanti (costi, benefici, eventuali breakthrough tecnologici) del quadro generale.

a.1 Ricarica rapida in corrente alternata

Studio sistemi ricarica rapida “contactless”: analisi e progettazione di un sistema di trasferimento dell’energia senza contatto

Le attività hanno riguardato lo studio della struttura e il progetto di Sistemi di Trasferimento dell’Energia Elettrica Senza Contatto (STEESC) con alti valori di efficienza del trasferimento energetico pur in presenza dello spazio sottopianale tra l’elemento trasmittente (fisso) e quello ricevente (a bordo mezzo), condizione usuale dei veicoli elettrici stradali, ed in presenza dei disallineamenti che si verificano con un mezzo in lento moto su di una serie di elementi trasmittenti attivati in sequenza.

Gli STEESC infatti, possono essere vantaggiosamente utilizzati per ricaricare gli accumulatori dei veicoli elettrici poiché offrono maggiore sicurezza contro i contatti accidentali e praticità (non più cavi volanti, protezioni, etc.) dei sistemi di ricarica convenzionali basati su spine e prese.

Per contro, oltre ai problemi di costo e di sicurezza EM, il rendimento energetico di questi sistemi è di almeno 10 punti percentuali inferiore ad una ricarica conduttiva perché il vettore energetico elettricità è soggetto a numerose trasformazioni, Figura 503, nel passaggio dalla rete alla batteria:

- a terra
 - conversione c.a. in c.c.
 - riconversione c.c. in c.a. ad elevata frequenza (decine di kHz)
 - trasmissione per accoppiamento induttivo
- a bordo
 - riconversione c.a. indotta nel secondario
 - modulazione della c.c. per l’alimentazione della batteria.

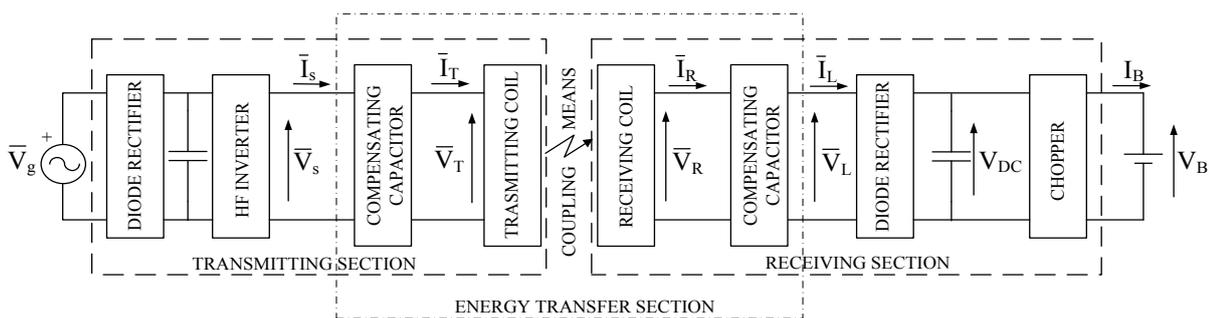


Figura 503. Schema a blocchi trasformazioni energetiche

La ricarica induttiva, da tempo in uso nel settore dei veicoli industriali (IPT Wampfler), è stata infatti realizzata anche per i veicoli elettrici stradali, in particolare con alcune realizzazioni nel settore dei mezzi per il trasporto pubblico locale, come l’autobus Elfo (prodotto dalla EPT di Brescia) e diversi mezzi della Bombardier, prima tram e poi autobus, PRIMOVE.

Come in tutti i sistemi induttivi, anche i tram e gli autobus della Bombardier (prototipi da 200 kW realizzati con costruttori come Rampini, Solaris, Hess, Van Hool etc) hanno bisogno di abbassare il secondario fin quasi a toccare il primario per ridurre al minimo il traferro e le perdite.

Attualmente sono oggetto di studio sistemi STEESC risonanti, nei quali le bobine sono collegate in serie o in parallelo a condensatori. I condensatori sono dimensionati in modo da risuonare con le bobine alla frequenza di alimentazione. L’instaurarsi della risonanza riduce l’impedenza del circuito visto dall’invertitore e consente di trasferire energia sul carico con maggiore efficienza e a distanze superiori. Il secondario può quindi essere montato in posizione fissa sotto il pianale del mezzo, a conveniente altezza da terra, e non sono necessarie manovre preparatoria alla ricarica.

Studi e ricerche relativi alla realizzazione di sistemi “risonanti” adatti sia a mezzi pesanti che a veicoli leggeri (autovetture), sono in corso sia in Europa (Progetti Europei Fabric, con il CRF ed Unplugged, con ENEL; progetto tedesco IndiOn, con Siemens e BMW) che negli Stati Uniti e in Oriente (Cina, Giappone ed il progetto coreano OLEV, On-Line-Electric-Vehicle, un autobus da 12 m in servizio regolare da pochissimo).

Di particolare interesse il progetto statunitense del DoE, il Vehicle Technology Program, che si sviluppa su 3 anni, fino al 2015, e coinvolge diversi istituti di ricerca (Argonne, INL, OakRidge etc).

Caratteristica comune a molti progetti in corso per la ricarica di veicoli leggeri è la bassa potenza installata, dell'ordine di 3,6 e 7,2 kW. Infatti la principale applicazione che si prevede per gli STEESC è nei parcheggi (car sharing e simili), dove la permanenza del mezzo è relativamente lunga e quindi le potenze in gioco (ed i costi del sistema a bordo veicolo) possono essere ridotti. A tale proposito è utile ricordare quanto sostenuto da Toyota e cioè che solo la ricarica induttiva dà un senso ai PHEV. Sistemi di tale potenza sono inoltre particolarmente adatti alle micro vetture, in genere equipaggiate con sistemi d'accumulo da 3-5 kWh, che potrebbero così ricaricarsi completamente in meno di un'ora.

Studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless

Nello studio (rapporto RdS/2013/182) è sviluppata la teoria degli STEESC con tecnologia ad accoppiamento induttivo sia che abbiano una topologia induttiva (STEESC induttivi) oppure una topologia risonante (STEESC risonanti), mostrando la convenienza di questi ultimi su quelli induttivi.

In estrema sintesi, risulta che per ottenere una buona efficienza di trasferimento dell'energia tra bobine debolmente accoppiate: i) gli STEESC sono alimentati con tensioni e/o correnti alternate di frequenza elevata, ii) le induttanze delle bobine sono compensate per mezzo di condensatori che risonano con esse alla frequenza di alimentazione; gli STEESC di questo tipo sono comunemente detti risonanti, e iii) le bobine vengono dotate di nuclei di ferrite con lo scopo di aumentare l'accoppiamento tra di esse; l'uso di ferriti consente di limitare le perdite magnetiche per isteresi e correnti parassite dovute al un funzionamento ad alta frequenza.

Utilizzando le formulazioni ricavate è stato svolto il dimensionamento di uno STEESC risonante della potenza di 600 VA (500 W sulle batterie) destinato alla carica lenta (8 ore) dell'accumulatore di una city car elettrica (Figura 504), un veicolo di serie a due posti.

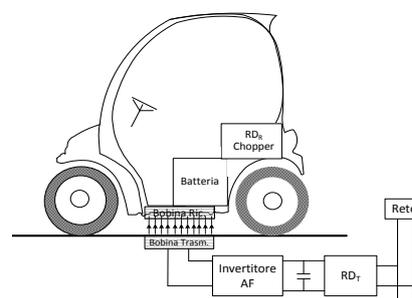


Figura 504. Disposizione dei componenti dello STEESC risonante a terra e sul veicolo

Il mezzo è un elettrico "puro" alimentato da un accumulatore a 48 V formato da 4 moduli da 12 V/100 Ah piombo-acido connessi in serie.

La rappresentazione circuitale della sezione di trasferimento di uno STEESC induttivo è riportata in Figura 505 dove L_T , R_T e \bar{I}_T sono l'autoinduttanza, la resistenza e la corrente della bobina trasmittente, L_R , R_R , \bar{V}_R e \bar{I}_R sono l'autoinduttanza, la resistenza, la tensione e la corrente della bobina ricevente.

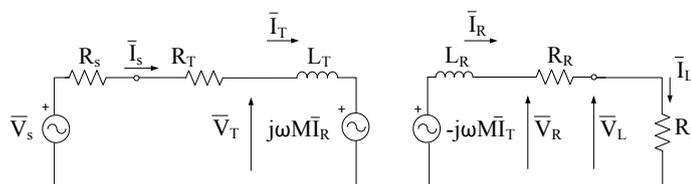


Figura 505. Rappresentazione circuitale di uno STEESC induttivo

Lo STEESC risonante presenta due condensatori: uno collegato in serie alla bobina trasmittente e l'altro alla bobina ricevente, come mostrato in Figura 506.

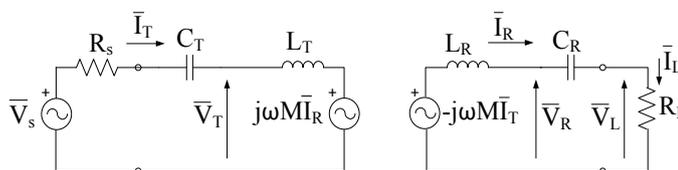


Figura 506. Rappresentazione circuitale di uno STEESC risonante con topologia serie-serie

STEESC risonante vs. STEESC induttivo

Il confronto tra le prestazioni di uno STEESC induttivo con quelle di uno STEESC risonante è stato condotto con l'aiuto di figure di merito introdotte in precedenza e calcolate nei due casi. Omettendo in questa sintesi i grafici che rappresentano in termini quantitativi del confronto, si ha:

1. L'efficienza dello STEESC induttivo resta sempre inferiore a quella dello STEESC risonante e, inoltre, risulta elevata solo in un intervallo relativamente ristretto di valori della resistenza equivalente di carico, che è soggetta ad ampie variazioni durante il processo di ricarica. Pertanto, anche tenendo di questa

caratteristica applicativa, è preferibile l'impiego di uno STEESC risonante.

2. Uno STEESC risonante, se ben progettato, richiede una potenza di dimensionamento del generatore di tensione solo di poco superiore a quella assorbita dal carico mentre uno STEESC induttivo richiede un dimensionamento del generatore di tensione per una potenza circa 50 volte maggiore di quella richiesta dal carico.
3. La corrente nel carico dello STEESC induttivo è circa 25 volte inferiore a quella di uno STEEC risonante. Ciò significa che, a parità di corrente nel carico, uno STEESC induttivo richiede una tensione di alimentazione V_S considerevolmente più elevata di uno STEESC risonante.
4. Infine, il dimensionamento delle bobine di uno STEESC risonante è più oneroso di quello delle bobine di uno STEESC induttivo e questo, assieme con l'utilizzo di condensatori, rappresenta il prezzo da "pagare" per l'utilizzo della topologia risonante e dei benefici che essa comporta per le altre figure di merito.

Analisi delle prestazioni di uno STEESC risonante

L'analisi delle prestazioni di uno STEESC risonante è stata condotta con l'aiuto delle figure di merito calcolate in precedenza. I grafici dell'efficienza riportati in Figura 507, tracciati in funzione dei fattori di qualità Q_T e Q_R delle bobine trasmittente e ricevente, mostrano che le due quantità aumentano in maniera monotona sia con Q_R che con Q_T , fino a raggiungere l'unità per valori elevati dei fattori di qualità delle bobine.

$$\begin{cases} Q_T = \frac{\omega L_T}{R_S} \\ Q_R = \frac{\omega L_R}{R_L} \end{cases}$$

dove ω è la pulsazione di lavoro dello STEESC.

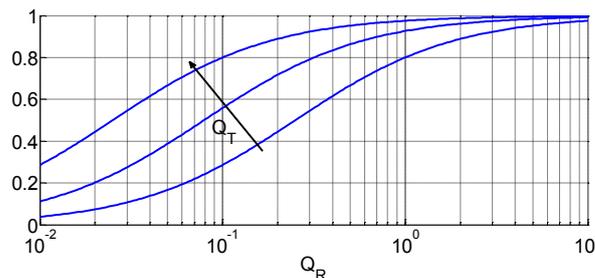


Figura 507. Efficienza e ampiezza per unità della corrente di carico vs. Q_R per diversi valori di Q_T

Lo STEESC risonante deve perciò essere realizzato in modo da possedere elevati fattori di qualità al fine di ottenere valori ragionevoli per l'efficienza e per il fattore di dimensionamento del generatore di tensione. D'altro canto, un elevato fattore di qualità della bobina ricevente comporta un alto fattore di dimensionamento della bobina stessa. Per ottenere i valori richiesti per i fattori di qualità senza ricorrere a bobine con autoinduttanze troppo elevate, la soluzione comunemente adottata è quella di alimentare gli STEESC risonanti ad alta frequenza. La scelta della frequenza di alimentazione deve essere poi compatibile con le capacità di commutazione e di dissipazione delle perdite nell'invertitore in AF della sezione trasmittente e nel raddrizzatore RD_R della sezione ricevente.

Progetto e verifica di uno STEEC risonante per una microvettura

Nel seguito dello studio si sono utilizzate le specifiche dello STEESC per ottenere i dati di progetto per i parametri induttivi delle bobine e procedere poi al loro dimensionamento. Tale operazione viene condotta in due fasi, dapprima effettuando un dimensionamento mediante approccio analitico e poi perfezionando i risultati per mezzo di un software agli elementi finiti mediante il quale sono state comparate le prestazioni ottenibili impiegando nuclei di forma diversa (Figura 508).

La sezione di potenza dell'invertitore in AF (Alta Frequenza) ha lo schema mostrato in Figura 509. E' composto di quattro interruttori elettronici di potenza con in parallelo i diodi di ricircolo. Alla frequenza di risonanza il carico visto dall'invertitore in AF è puramente resistivo. Di conseguenza la corrente risulta in fase con la tensione e le commutazioni degli interruttori di potenza a

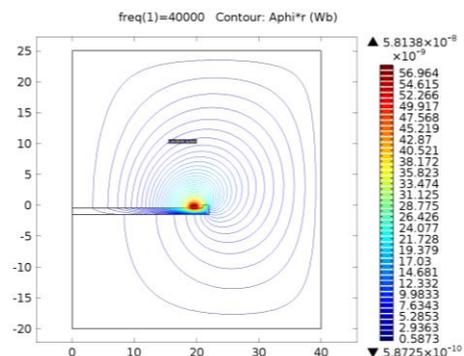


Figura 508. Linee di induzione magnetica con nucleo a C

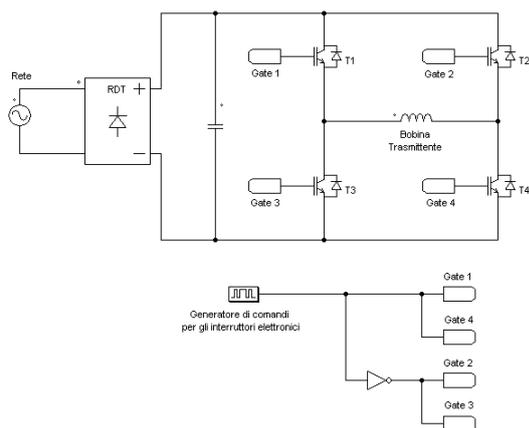


Figura 509. Schema di principio dell'invertitore in alta frequenza

semiconduttore avvengono in corrispondenza dei passaggi per lo zero della corrente (soft-switching). Per questo motivo le perdite di commutazione degli interruttori elettronici sono idealmente azzerate, aumentando l'efficienza complessiva dello STEESC risonante. Supponendo che l'efficienza del raddrizzatore a diodi DR_T sia del 95% e ricordando che l'efficienza del trasferimento di energia è stata posta non inferiore al 95% e quella del sottosistema formato dal raddrizzatore a diodi DR_R e dal chopper è stata supposta pari al 90%, l'efficienza complessiva dello STEESC risulta non inferiore al 81%.

Il funzionamento dello STEESC risonante oggetto di studio è stato infine esaminato per via numerica utilizzando un software per simulazioni circuitali. I valori ottenuti dall'esame per via numerica hanno confermato i risultati ottenuti in sede di progetto, confermando la validità delle scelte.

Nel progetto sono stati selezionati interruttori elettronici di potenza in grado di assicurare tempi di commutazione rapidi, compatibili con la frequenza di lavoro prevista che è notevolmente superiore a quella comunemente adottata per le applicazioni industriali di conversione statica di potenza. Rapidi tempi di commutazione garantiscono anche basse perdite durante le singole commutazioni. A tal proposito, si rileva che negli ultimi anni sono apparsi sul mercato interruttori elettronici di potenza che utilizzano il nitruro di gallio (GaN) e il carburo di silicio (SiC) al posto del silicio, per realizzare rispettivamente transistori di tipo MOSFET e diodi. I due composti si comportano come un materiale semiconduttore che, rispetto al silicio, presenta valori maggiori per la banda proibita di energia compresa tra la banda di valenza e quella di conduzione, per la mobilità delle cariche e per la loro velocità di saturazione. Queste proprietà conferiscono agli interruttori elettronici di potenza realizzati con GaN e SiC la capacità di sopportare elevate temperature di funzionamento ed elevate tensioni di scarica, di commutare rapidamente e di produrre basse cadute di tensione. L'utilizzo di tali interruttori, come pure l'adattamento del progetto ad altro tipo di veicolo, e.g. con batterie Li-Ione, potrà essere oggetto di attività in annualità successive.

Realizzazione prototipo caricabatterie reversibile e prove al banco

In prosecuzione delle attività sviluppate nell'annualità 2011-2012, è stato realizzato e sperimentato un caricabatteria "integrale" attraverso la riconfigurazione di un invertitore di trazione.

In effetti, i moderni BEV spinti da motori trifase a corrente alternata, di tipo sincrono o asincrono, montano invertitori trifase che sostanzialmente sono convertitori DC-AC bidirezionali, dove la bidirezionalità è già attivamente utilizzata per la ricarica delle batterie nella fase di frenatura a recupero. La principale differenza funzionale tra l'invertitore di un normale azionamento di trazione ed un caricabatteria "integrale" è che nel secondo la funzione di ricarica delle batterie è gestita tenendo conto, oltre che degli aspetti termici legati alla maggior durata di una ricarica da rete rispetto a quella di una frenata, anche della necessità di evitare la propagazione di disturbi in rete.

Il caricabatteria "integrale" è quindi un invertitore in "reverse mode" (Figura 510), che integra due funzioni: quella di alimentazione e controllo della M.E. (macchina elettrica) durante la marcia (DC/AC) e quella di ricarica (AC/DC) dell'accumulo elettrico nelle soste, così da evitare il maggior costo di un caricabatteria ad alta potenza in AC.

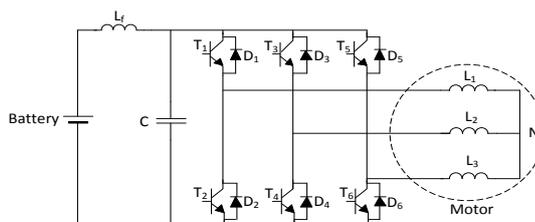


Figura 510. Inverter per alimentazione motore trazione

Infatti, le potenze di dimensionamento degli invertitori di trazione sono generalmente molto maggiori delle potenze dei caricabatteria installati a bordo dei PEV per la ricarica lenta, e di conseguenza i caricabatteria integrali possono essere in grado di eseguire la carica rapida (1 ora) del mezzo.

Il caso di studio preso inizialmente in esame è il Ducato, un veicolo commerciale leggero puramente elettrico prodotto da Fiat SpA ed elettrificato da Micro-vett SpA. Il powertrain è formato da un accumulatore e da un azionamento di trazione, composto a sua volta da un invertitore trifase e da un motore asincrono.

Il fallimento dell'azienda, avvenuto a febbraio del 2013, ha tuttavia costretto a modificare le specifiche iniziali, ipotizzando un powertrain costituito da un motore asincrono da 30 kW nominali ed una batteria Li-Ione ad alta tensione (400 V), già disponibile in laboratorio, precedentemente fornito da ENEL per l'effettuazione di prove di ricarica rapida.

La possibilità di disporre di un inverter progettato "ad hoc" per quest'applicazione rende non più necessaria la verifica del funzionamento del powertrain in condizioni nominali e di picco della potenza sviluppata dal motore e il suo impatto sul comportamento dell'accumulatore e dell'invertitore, perché il campo specificato per la tensione nominale dell'invertitore è stato determinato dal campo di variazione della tensione dell'accumulatore, che è un dato di ingresso (215 V - 400 V).

Progetto e realizzazione del caricabatteria integrale

Il "caricabatterie integrale" realizzato nell'ambito del progetto (rapporto RdS/2013/267) è in grado di gestire la ricarica veloce (AC/DC) dell'accumulo elettrico (range di tensioni: 200-400 V) di un veicolo elettrico a batteria o di un ibrido plug-in nelle soste e di funzionare per l'alimentazione ed il controllo della M.E. durante la marcia (DC/AC), con una potenza nominale di 43 kW in entrambe le funzioni.

Per adattare la tensione di uscita dell'inverter in funzionamento reverse a quella della batteria in fase di ricarica rapida senza pregiudizio alla rete è stato utilizzato un trasformatore ed un raddrizzatore ad alta frequenza. Lo schema generale dell'apparecchiatura è riportato in Figura 511.

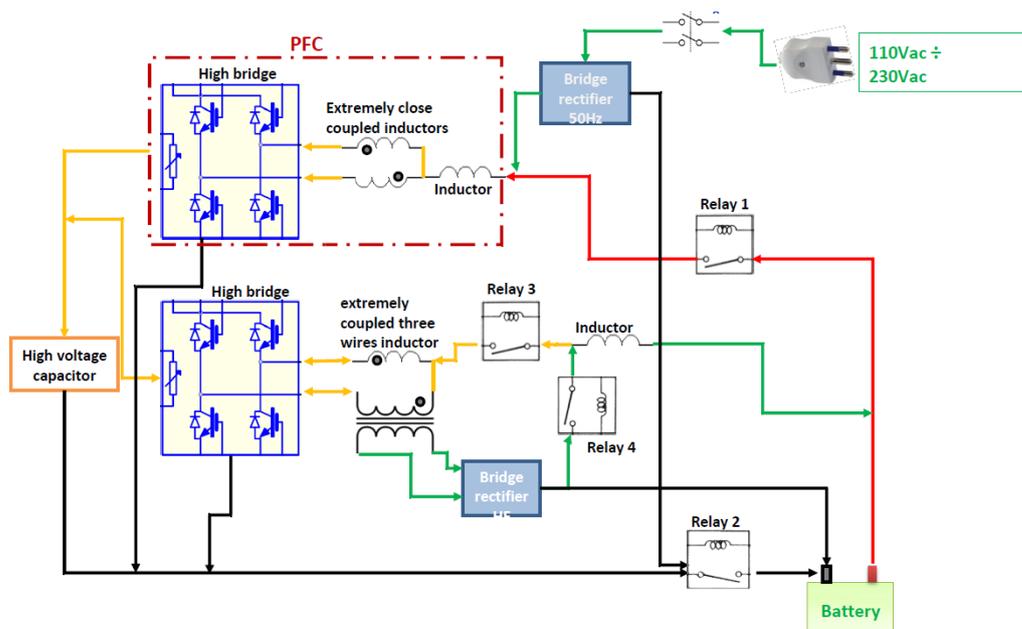


Figura 511. Schema a blocchi caricabatterie integrale

Il ponte raddrizzatore a 50 Hz, collegato al cavo di rete, raddrizza la tensione ed attraverso un sistema di induttanze si crea la tensione di ingresso al primo stadio costituito da quattro switch a semiconduttore che realizzano le diagonali di un ponte ad H ad alta frequenza, l'alta tensione e l'ingresso del secondo stadio costituito anch'esso da quattro switch a semiconduttore che realizzano le diagonali di un ponte ad H ad alta frequenza. Il secondo stadio alimenta il primario di un trasformatore il cui secondario fornisce la tensione ad un ponte a diodi ad alta frequenza. L'uscita di questo è collegato ad un filtro, poi si entra in batteria. Il riferimento di corrente è generato dal sistema di gestione della batteria (BMS) ed utilizzato dalla scheda di controllo ed il duty-cycle del segnale PWM BMS varia proporzionalmente con la corrente di carica richiesta. L'apparecchiatura è sufficientemente compatta (350 mm x 250 mm x 950 mm) e leggera (30 kg) per poter essere collocato a bordo veicolo.

In questa configurazione d'uso, l'apparecchiatura consente l'utilizzo di colonnine "Fast Charge" in AC, come quella recentemente sviluppata da ENEL, molto più economiche (3000 € contro 30.000 €) delle colonnine di ricarica "Fast Charge" in c.c. (CHAdEMO), potendo così contribuire (se adottata dai costruttori di autoveicoli) allo sviluppo ed alla diffusione del veicolo elettrico stradale.

Sperimentazione del caricabatteria integrale

A valle della progettazione del dispositivo per la ricarica secondo le indicazioni di reversibilità è stata espletata la gara per la realizzazione del prototipo. La sperimentazione del prototipo di caricabatterie integrale si è svolta testando la funzionalità del dispositivo per le funzioni di caricabatteria e per la capacità ad operare in azionamento per i motori (rapporto RdS/2013/268).

La Figura 513 mostra i segnali rilevati al banco durante le operazioni di test nella modalità di caricabatteria. In questi test il pacco batterie era non controllato (batterie al Pb) con una tensione nominale di 180 V. Il bus CC era pilotato a 320 V con una tensione in a.c. da rete a 220 V efficaci. La corrente di ricarica è stata mantenuta a 8 A .

E' stata provata anche la condizione inversa ossia di azionamento motore (Figura 514). In particolare si riporta la corrente erogata dalla batteria allo spunto del motore ed il recupero in frenata.

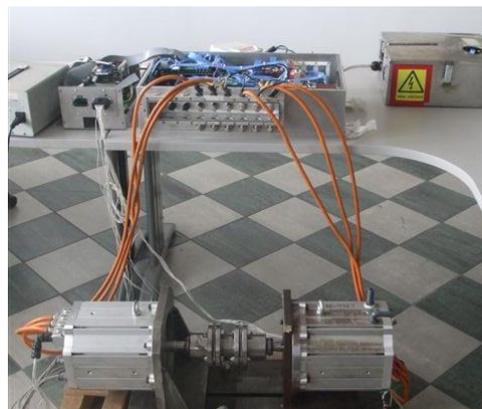


Figura 512. Test al banco

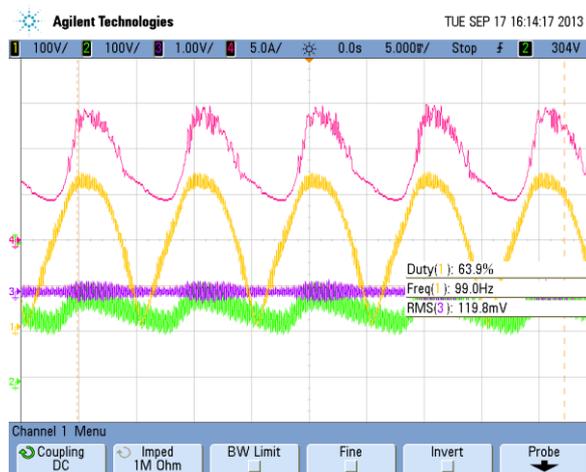


Figura 513. Test in modalità caricabatterie

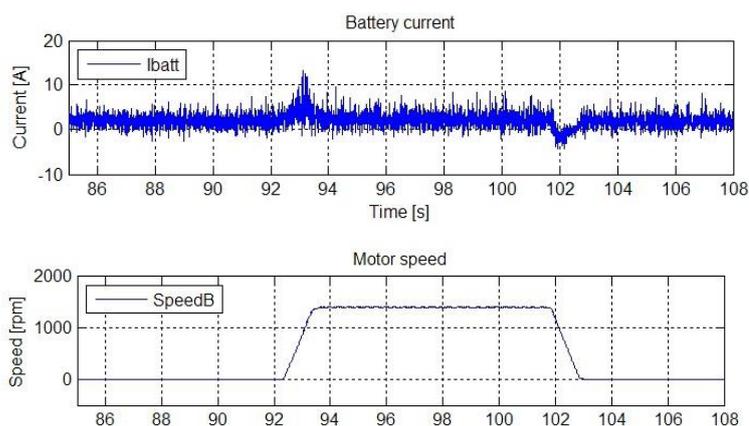


Figura 514. Test in modalità di trazione

In una fase successiva verrà testato prima il funzionamento a 23 kW come caricabatteria di una batteria Li-Ione da 11,5 kWh (288V/40 Ah), che consente la ricarica a 2C, e, come ultima fase, la prova a potenza massima (43 kW) per la ricarica in 30 min della batteria da 25 kWh della Nissan Leaf, acquisita con fondi di altra provenienza.

Le prove, pur costituendo quelle eseguite un insieme idoneo a verificare le funzionalità della macchina, proseguono con la verifica delle prestazioni della macchina ai valori corrispondenti alla potenza nominale di 43 kW e con la

valutazione dell'efficienza del sistema di conversione della potenza, tanto nel funzionamento diretto che in quello "reverse".

a.2 Ricarica rapida in corrente alternata

Sistema di ricarica integrata con compensatore: prove di ricarica con rilevazione dei parametri di efficienza e power quality

L'obiettivo dell'attività (rapporto RdS/2013/135) è quello di ricreare, e proporre una soluzione, per le future criticità sulla rete elettrica, che possono verificarsi attraverso la diffusione dell'energia distribuita e la necessità di alimentare carichi puntuali ad alta potenza presenti con andamento aleatorio come quelli che si verranno a creare dalle stazioni di ricarica veloce dei veicoli elettrici. A tal fine l'ambito scientifico ed il mercato si stanno muovendo verso l'utilizzo di sistemi di accumulo elettrochimico. Per questo si è deciso di analizzare i benefici apportati alla rete elettrica BT dall'utilizzo di un sistema di un compensatore statico da 30 kVA presente nel C.R Casaccia durante la ricarica veloce del veicolo elettrico con la stazione CHadeMo da 55 kW. In particolare parte della potenza necessaria alla ricarica veloce del veicolo verrà fornita dal sistema di storage di cui è fornito il compensatore e parte dalla rete BT.

Quanto svolto in merito alla realizzazione di una stazione di ricarica integrata ha trovato convergenza con le attività svolte nell'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia", nello specifico, all'obiettivo a, "Reti di poligenerazione distribuita" del Progetto "Studi e sviluppo di strumenti per il miglioramento dell'efficienza energetica nel settore civile, servizi e industria". In questa sede, infatti, sono stati sviluppati modelli di monitoraggio e controllo della rete nell'ambito dall'Accordo di Collaborazione in essere tra ENEA ed Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE).

Nel campo di impiego in bassa tensione le funzioni che può svolgere il compensatore sono quelle di compensazione della potenza attiva e reattiva assorbita dalle utenze controllate con funzioni di peak shaving o load levelling in modo da ottimizzare i flussi di potenza forniti dalla sorgente (rete), oltre che di consentire il possibile funzionamento in isola nell'evenienza di una disalimentazione dalla rete di distribuzione e impiegando le risorse disponibili localmente. Il compensatore statico ha un dispositivo di controllo per la gestione dei flussi di potenza sulla sbarra in corrente continua interfacciato con i convertitori DC-DC dell'accumulo e del sistema di sfioramento passivo (resistenza di frenatura), nonché con l'inverter. Lo schema dei dispositivi presenti nel compensatore utilizzato per le prove in oggetto al suo interno è mostrato in Figura 515.

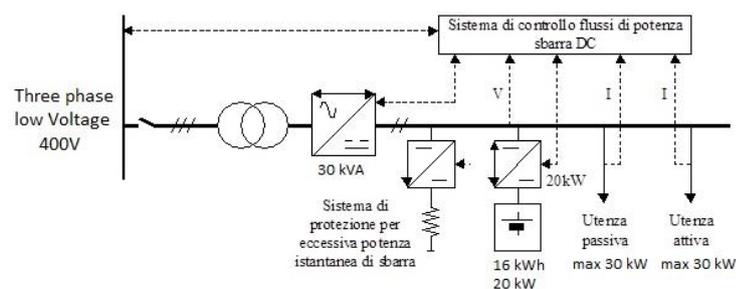


Figura 515. Schema di principio del compensatore statico impiegato per il supporto alla colonnina CHAdEMO

In particolare il bilanciamento della potenza è ottenuto mantenendo costante la tensione sulla sbarra in corrente continua a 600 V. I set-point di potenza ai dispositivi attuatori possono essere forniti manualmente, attraverso il pannello frontale, o in remoto attraverso comunicazione CAN secondo una logica definita. Le prestazioni in termini di potenza attiva erogabile sono limitate temporalmente dalle caratteristiche degli accumulatori impiegati e quindi sono capaci di erogare una potenza di 20 kW per almeno 15 minuti, avendo al loro interno un'energia totale di 16 kWh. Il sistema di conversione è in grado di scambiare continuamente una potenza di 30 kVA, in modo da poter comunque svolgere le altre funzioni, come ad esempio di compensazione di potenza reattiva, senza alcuna limitazione delle prestazioni.

Al fine di implementare una procedura di peak-shaving del compensatore statico durante la ricarica veloce, è stato utilizzato il sistema di monitoraggio e controllo per le reti energetiche implementato durante questa annualità dal Dipartimento DIAEE dell'Università di Roma Sapienza (rapporto RdS/2013/103).

Lo schema a blocchi che caratterizza il sistema studiato è indicato in Figura 516, con riferimento alla fornitura in BT dell'edificio F33 dalla cabina 11 MT/BT del Centro Ricerche ENEA di Casaccia, dove è posizionata sia la colonnina CHAdEMO sia il compensatore statico. Le linee che alimentano il compensatore statico e la colonnina di ricarica sono derivate dallo stesso interruttore generale di edificio, mentre gli apparati di misura installati sono localizzati:

- 1) in cabina, sul lato bassa tensione, dove è acquisita la potenza totale fornita alle diverse utenze;
- 2) a valle dell'interruttore che gestisce la colonnina di ricarica.

Il sistema di controllo è in grado di acquisire tali segnali e scambiare continuamente informazioni con il compensatore in modo da decidere quale potenza attiva e reattiva far erogare o assorbire al compensatore statico.

Prove sperimentali e relative analisi

Il sistema di controllo implementato, è stato utilizzato per acquisire:

- la potenza assorbita dalla colonnina di ricarica;
- la potenza assorbita dall'intera cabina MT/BT;
- i valori di tensione, corrente e potenza del compensatore.

In base a tali valori il sistema di controllo decide se fornire o assorbire potenza dalla rete. Le richieste per l'acquisizione dati sono state effettuate attraverso modbus su TCP/IP. Il sistema di controllo, elaborando i dati acquisiti, invia la decisione all'energy storage attraverso il protocollo e l'interfaccia CAN presente e configurata a 250 kBit/s. Il pannello frontale è mostrato in Figura 517. La risoluzione temporale di tale sistema comporta l'analisi e l'invio dei dati una volta al secondo.

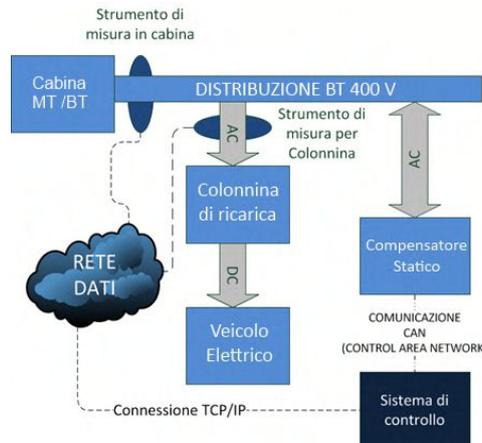


Figura 516. Schema a blocchi del sistema implementato (Potenza e comunicazione dati)

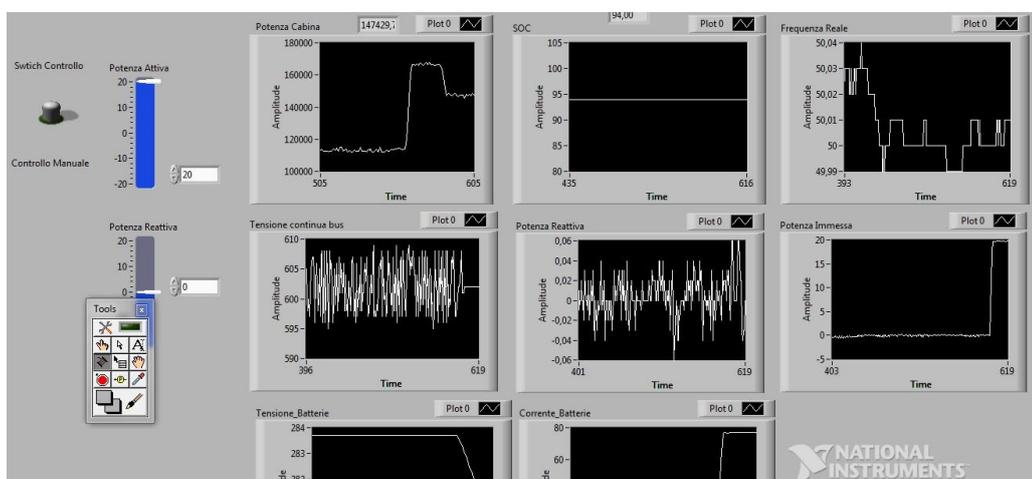


Figura 517. Gestione di un sistema di storage attraverso l'integrazione con il sistema di monitoraggio

La logica implementata è stata quella del Peak Shaving. Tale logica prevede l'acquisizione della potenza da parte del sistema di smart metering e successivamente la decisione della potenza che l'Energy Storage System deve erogare o meno al fine di non superare un certo valore di potenza totale. Come caso applicativo sono state inserite diverse soglie per la potenza della colonnina di ricarica in modo tale che una volta superato tale valore di potenza, il compensatore eroghi la differenza di potenza dalla soglia, limitando tale emissione al valore massimo che può erogare, e quindi 20 kW. Esaminando il diagramma di carico della ricarica della Nissan Leaf, il veicolo elettrico utilizzato, si è deciso di far lavorare il compensatore a massima potenza. Per questo è stata effettuata una prima sperimentazione dove è stata inserita una soglia di 35 kW dopo la quale il compensatore si avvia e compensa il valore di potenza in eccesso a tale soglia, fino ad arrivare ad erogare la sua potenza massima.

In una seconda prova sperimentale, è stata effettuata la ricarica del veicolo elettrico partendo da un SOC iniziale del pacco batterie del veicolo elettrico di circa il 40%, e le batterie del compensatore cariche all'85%. Il grafico ottenuto è diviso sostanzialmente in due parti. Nella prima parte la ricarica effettuata è una ricarica veloce che porta il SOC di batteria del veicolo elettrico ad un valore pari all'85%. Nella seconda si è effettuata una seconda

ricarica per portare il SOC della batteria del EV al 100%. Infatti dopo 1300 secondi, la potenza assorbita dalla colonnina è circa 0 e quindi la ricarica veloce è terminata. Negli istanti successivi si è effettuata l'ulteriore ricarica.

Nel dettaglio le prove effettuate hanno:

- previsto l'inserimento, nei primi 120 secondi di ricarica, di una soglia molto bassa per far erogare al compensatore la massima potenza di 20 kW e capire il suo dinamismo rispetto alla richiesta di potenza della colonnina di ricarica;
- previsto l'inserimento di una soglia di 35 kW negli istanti successivi fino a che la potenza immessa del compensatore non si è portata a 0;
- un ulteriore cambiamento di soglia a 15 kW dopo circa 480 secondi.

Come si evince dal grafico di sintesi riportato in Figura 518, una volta impostata la soglia, il sistema di controllo tenta di stabilizzare la potenza assorbita dalla colonnina fornendo la potenza in eccesso alla soglia impostata da software. Infatti, come si può osservare dall'andamento del grafico sottostante, il compensatore statico funzionando in modalità peak shaving, fa erogare all'interruttore generale una potenza nettamente inferiore di quella richiesta dalla colonnina CHAdeMO, in particolare durante la prima fase di ricarica caratterizzata dal massima richiesta di potenza.

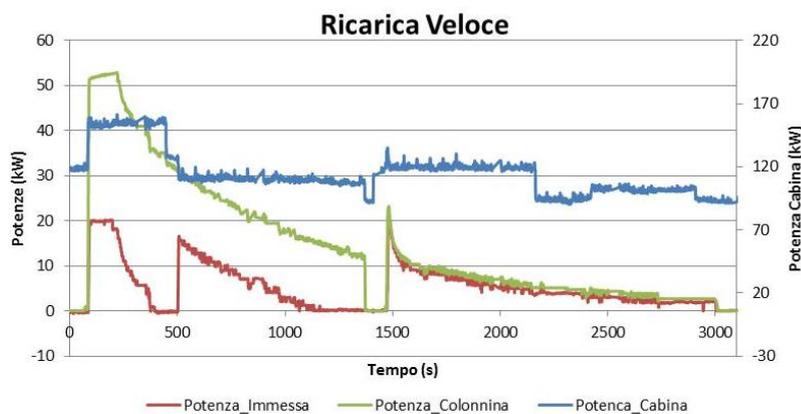


Figura 518. Sperimentazione 2

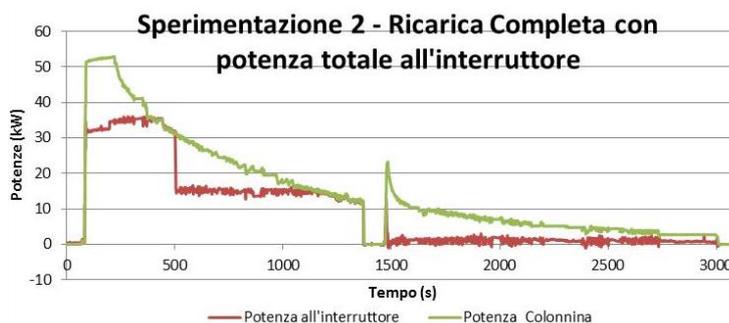


Figura 519. Potenza erogata dalla all'interruttore generale dal quale sono derivati sia la colonnina chademo sia il compensatore statico

Da una analisi energetica delle misure effettuate durante la ricarica si evince che l'energia totale assorbita dalla colonnina nella sperimentazione è stata di 12,4 kWh, mentre l'energia fornita dal compensatore è stata di 4,5 kWh, pari al 36%.

La figura 520 mostra la visione completa del setup di prova: una stazione di ricarica Circutor con protocollo di ricarica CHAdeMO, il compensatore statico e la vettura Nissan Leaf utilizzata come carico per la stazione di ricarica.



Figura 520. Apparato sperimentale stazione di ricarica combinata

Le prove hanno visto anche il monitoraggio con il sistema di misura realizzato nel medesimo obiettivo dalla collaborazione con l'Università de L'Aquila. In monitoraggio ha evidenziato il calo di tensione sull'ingresso della stazione di ricarica che si è ridotto nel tempo via via che la stazione erogava una minor potenza. Le misure confrontate con quelle eseguite anche in cabina ed al quadro di distribuzione hanno identificato questo calo come localizzato alla sola stazione di ricarica ed addebitabile al cavo di collegamento al limite delle prestazioni necessarie per la limitazione delle perdite di collegamento. In

Figura 521 si evidenzia come la tensione delle singole fasi cali del 2% in ingresso all'atto dell'erogazione della massima potenza da parte della stazione di ricarica. Successivamente al diminuire della potenza erogata gli effetti si riducono.

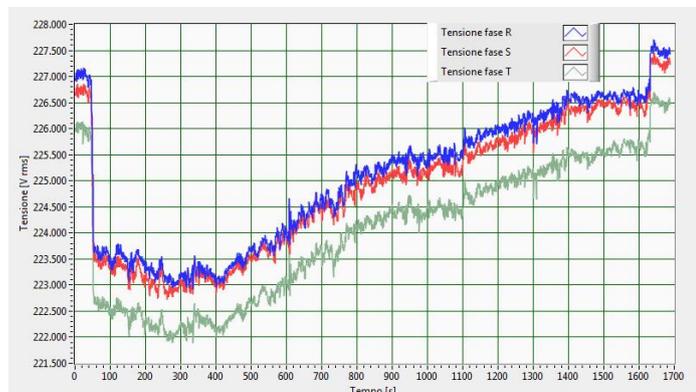


Figura 521. Tensione in ingresso colonnina di ricarica

Il fattore di potenza rilevato nella fase di ricarica mostra un valore intorno a 0,92 a piena potenza mentre si porta su valori più bassi intorno 0,8 quando la ricarica avviene a bassi livelli di potenza erogata. Il comportamento è addebitabile al peggioramento dell'incidenza della potenza distorta sulla potenza totale e quindi del rapporto tra potenza apparente e potenza attiva.

Studio teorico-sperimentale delle prestazioni dei convertitori DC/DC per la ricarica rapida

Gli obiettivi conseguiti con tale attività sono due. Il primo concerne lo sviluppo e la realizzazione di un sistema automatico di collaudo e di test per convertitori di potenza DC/DC, ed AC/DC; il secondo consiste nella verifica delle prestazioni di convertitori di potenza, in condizioni realistiche di funzionamento, tramite una campagna di misure effettuata presso il Centro Ricerca ENEA Casaccia, utilizzando il sistema di misura sviluppato. Il convertitore testato è il modello EQC-50 ENDESA Circutor, di potenza nominale 75 kW AC, equipaggiato con il sistema di ricarica rapida a standard CHAdeMO, ed è stato utilizzato per effettuare una serie di ricariche rapide per il pacco batterie dell'autoveicolo elettrico Nissan Leaf, a partire da differenti condizioni di carica residua.

Il sistema automatico di collaudo e di test consente di eseguire la misurazione di parametri elettrici, nonché termici, in ingresso ed in uscita dal sistema di conversione, con la possibilità di acquisire dati per lunghi intervalli di tempo, dell'ordine delle decine di minuti, nonché di effettuare misurazioni in linea e fuori linea per la valutazione delle prestazioni e del funzionamento del sistema sotto test.

La verifica sperimentale delle prestazioni di convertitori statici è un'attività che consente di validare le caratteristiche dei convertitori mediante confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti in sede di progetto, e permette di elaborare le curve effettive inerenti le grandezze elettriche durante diverse condizioni di funzionamento realistiche, evidenziando eventuali criticità.

Il sistema di collaudo e di test necessario per tale applicazione è stato sviluppato come una stazione automatica di misura, basata su un PC equipaggiato con una scheda di acquisizione dati e con trasduttori di tensione corrente e con un sistema di data logging per le misurazioni della temperatura; per la acquisizione e l'elaborazione dei dati di misura è stato sviluppato un software dedicato in ambiente National Instruments LabVIEW. L'acquisizione dei valori di tensione e corrente all'ingresso ed all'uscita del convertitore è eseguita con campionamento ad elevata frequenza, in modo da poter valutare correttamente l'efficienza del convertitore anche in condizioni dinamiche. La misurazione della temperatura di più punti del convertitore e dell'ambiente consente di verificare l'efficiente smaltimento del calore generato dalle perdite del convertitore. I trasduttori di tensione e di corrente sono stati scelti privilegiando la precisione e la banda passante, con portate individuate a partire dalle specifiche del convertitore da collaudare.

Sono state effettuate, una serie di prove di ricarica rapida, a partire da diverse condizioni di carica residua delle batterie. La mole di dati acquisiti è pari a circa 6,6 GByte, per corrispondenti 90 minuti complessivi di durata delle prove. Il sistema di ricarica rapida CHAdeMO non consente di impostare parametri dall'esterno, durante le prove di carica; la procedura viene gestita in modo automatico mediante comunicazione tra il sistema di controllo dell'autoveicolo ed il sistema di carica. Tuttavia, durante l'esecuzione delle prove si possono individuare degli intervalli temporali in cui il sistema si può considerare in condizioni stazionarie, ed altre in condizioni transitorie. I dati acquisiti sono pertanto presentabili in modo differenziato, per permettere la verifica del funzionamento del sistema in diverse condizioni:

1. Verifica delle prestazioni in condizioni stazionarie, con carico e convertitore in condizioni di regime. Per brevi periodi, della durata di alcuni secondi, le condizioni del convertitore e delle batterie del veicolo possono considerati costanti, con buona approssimazione. Le prove sono state effettuate a partire da diversi livelli di carica residua dell'autoveicolo.
2. Verifica delle prestazioni in condizioni dinamiche, con variazioni di dell'assorbimento di potenza in condizioni di alimentazione costante (tensione DC costante), ed in condizioni di carico costante (corrente DC costante), con variazioni della tensione di alimentazione. In tali tipologie di verifica, sono analizzati i periodi transitori del funzionamento a tensione DC costante ed a corrente DC costante.
3. Verifica delle prestazioni complessive, durante il processo di ricarica con analisi dei dati focalizzata alla visualizzazione degli andamenti complessivi nel tempo (condizioni realistiche).

Le misurazioni di temperatura non sono state eseguite, in quanto né il sistema di carica rapida né l'autovettura consentono, attualmente, l'inserimento di sonde sul convertitore o sul pacco batterie. Saranno oggetto di ulteriori prove.

I risultati delle misure effettuate hanno evidenziato che il convertitore ha buone prestazioni in termini di erogazione di potenza, con rendimenti di conversione che si mantengono al di sopra del 90% in condizioni di funzionamento a corrente costante ed a tensione costante; tuttavia le correnti AC che il convertitore assorbe dalla rete in bassa tensione sono fortemente distorte, con valori di distorsione armonica che sono sempre superiori al 27% con valori che possono superare il 60%. Ciò rende problematico l'utilizzo dello stesso nelle comuni reti in bassa tensione, senza l'inserimento di opportuni sistemi di filtraggio delle componenti armoniche di corrente.

Dalle forme d'onda delle grandezze elettriche risulta evidente che la conversione AC/DC è effettuata tramite un convertitore trifase a commutazione naturale (ponte trifase totalcontrollato). Tale soluzione, sebbene si basi su una tecnologia consolidata e affidabile e permetta di ottenere elevati valori del rendimento di conversione con costi contenuti, genera inevitabilmente correnti alternate fortemente distorte la cui distorsione può soltanto essere ridotta utilizzando accorgimenti dedicati quali l'utilizzazione di filtri d'ingresso e/o particolari trasformatori. È per tale motivo che, per effettuare la conversione AC/DC, si dovrebbero attualmente utilizzare convertitori a commutazione forzata che permettono di realizzare il PFC, cioè di assorbire correnti alternate con un ridottissimo THD e in fase con la tensione di rete.

Ad integrazione della presente attività di misurazione, sarebbe opportuno valutare le prestazioni del sistema di conversione, al variare della impedenza dell'anello di guasto nel nodo di collegamento dello stesso: le prestazioni in termini di rendimento e di potenza effettiva disponibile per la ricarica potrebbero essere dipendenti da questo parametro della rete. Una ulteriore caratterizzazione del sistema dovrebbe essere effettuata al variare del contenuto armonico della tensione di rete, secondo la normativa vigente, in modo da quantificare eventuali incrementi delle potenze attive scambiate dalle componenti armoniche di ordine superiore.

Dettagli sul sistema realizzato e sui risultati delle prove svolte sono contenuti nel rapporto RdS/2013/134.

a.3 Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali (IEA)

L'attività ha riguardato la partecipazione attiva ad alcune iniziative internazionali che sono una fonte continua di scambio e di orientamento dei programmi e delle attività nazionali sui sistemi di accumulo in batterie per applicazioni mobili e stazionarie. La partecipazione è anche funzionale al ruolo di supporto tecnico-scientifico e programmatico che l'ENEA svolge per i Ministeri competenti e per l'industria nazionale nel suo complesso. Pertanto sono proseguite le attività relative alla partecipazione all'Implementing Agreement (IA) HEV (Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes) dell'International Energy Agency (IEA).

Inoltre su richiesta del Ministero dello Sviluppo Economico (MSE), è stata avviata la partecipazione italiana all'EVI (Electric Vehicle Initiative), coordinata dall'IEA, sviluppata nell'ambito del CEM (Clean Energy Ministerial). Il CEM è un forum globale ministeriale creato nel 2010 con lo scopo di condividere pratiche virtuose e promuovere politiche e programmi che aiutano la transizione verso un'economia energetica pulita. Le iniziative CEM mirano a ridurre le emissioni, a migliorare la sicurezza energetica, facilitare l'accesso alle risorse energetiche pulite e sostenere lo sviluppo economico. Finora 23 governi con diversi ministeri hanno aderito al CEM. In quest'ambito sono state avviate 13 iniziative di collaborazione secondo lo schema illustrato nella Figura 522. In particolare, è in corso un'iniziativa sui veicoli elettrici.

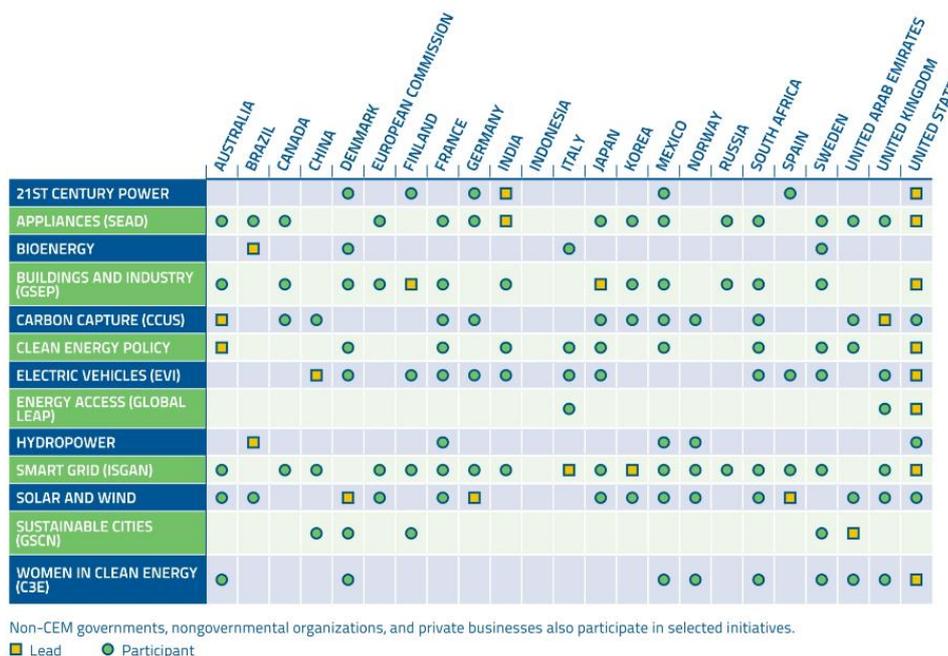


Figura 522. Iniziative e partecipazione al CEM

La partecipazione alle attività dell'IEA IA HEV

Nell'ultimo anno, è proseguita la partecipazione attiva alle attività dell'IEA su "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes". A tal proposito, oltre a contribuire alla consueta preparazione del Rapporto Annuale, contenente un ampio aggiornamento sullo stato dei programmi e della diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi nel mondo, è stato approvato un programma sperimentale per la verifica dei protocolli di invecchiamento delle batterie al litio, coordinato dall'ENEA; inoltre, l'ENEA, mantenendo la vicepresidenza dell'Accordo, continua ad avere un controllo ed un monitoraggio privilegiato sulla situazione nei vari paesi partecipanti, che sono stati esaminati in 2 riunioni collegiali del Comitato Esecutivo (ExCo) in Germania (Stoccarda), a Novembre 2012, e negli Stati Uniti (Chicago) ad aprile 2013. La partecipazione nell'ultimo anno è ulteriormente aumentata. Attualmente 18 nazioni sono coinvolte: Austria, Belgio, Canada, Corea del Sud, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Irlanda, Italia, Olanda, Portogallo, Regno Unito, Spagna, Svezia, Svizzera, Turchia, Stati Uniti. Ci sono inoltre molti paesi osservatori in attesa di un'ufficiale adesione, quali: Brasile, Cina e Commissione Europea. Sono attivi 10 Task su diversi temi che vanno dallo scambio di informazioni all'analisi del mercato e delle tecnologie.

L'ENEA partecipa a diversi Task:

Task 1 Information Exchange: questo Task consente lo scambio di informazioni tra i membri dell'IA e ha lo scopo di raccogliere, analizzare e diffondere informazioni complete sui veicoli elettrici e dei programmi nazionali di

incentivazione e diffusione. Nell'ultimo anno sono stati organizzati due riunioni di esperti in concomitanza con le riunioni dell'EXCO in cui sono state presentate le attività dei vari paesi partecipanti

Task 10 Electrochemical systems: questo Task consente di scambiare in maniera coordinata informazioni ed aspetti critici dei sistemi di accumulo per veicoli elettrici. Le attività sono svolte organizzando annualmente 1-2 workshop ad invito su temi di interesse comune, tra cui ad esempio: il riciclaggio delle batterie a litio, il comportamento di tali batterie in condizioni climatiche estreme. Nell'ultimo anno sono stati individuati nuovi tempi di scambio da organizzare nel prossimo anno, quali: il "second life" delle batterie; l'effetto della ricarica rapida; il comportamento in condizioni estreme; il testing di batterie per ibridi plug-in.

Task 21 Accelerated Ageing Testing for Li-ion Batteries: questo Task ha l'obiettivo di confrontare a livello internazionale le procedure di prove di vita accelerate per batterie al litio, mediante un *round robin test* nei laboratori coinvolti per sviluppare delle procedure comuni. L'ENEA è il coordinatore (OA) di questo task che vede la partecipazione di Stati Uniti e Svizzera ed il potenziale interesse di altre 10 paesi partecipanti. Le attività sono state già avviate con la definizione del piano di lavoro.

Nell'ultimo anno, sono stati anche realizzati alcuni prodotti di ampia diffusione, a cui l'ENEA ha partecipato: il Rapporto Annuale 2012 con la preparazione di una sintesi sullo stato dell'arte delle attività nazionali sui veicoli elettrici e sullo stato del mercato corrispondente. Inoltre è stato predisposto dalla Segreteria con il contributo dell'ExCo un documento relativo ad esempi di successi nell'uso od nell'introduzione di veicoli elettrici, denominato "IA-HEV Outlook for 2013". Questo documento contiene anche una tabella aggiornata sui principali strumenti di strategia nazionali e di incentivazione dei veicoli elettrici introdotti nel 2013 nei diversi paesi partecipanti.

Tabella 116. Stato degli incentivi nei vari paesi dall'IEA IA HEV Outlook 2013

	Austria	Belgium	Canada	Denmark	Finland	France	Germany	Ireland	Italy	Republic of Korea	Netherlands	Portugal	Spain	Sweden	Switzerland	Turkey	United Kingdom	USA
National e-mobility implementation plan in place	●	●	●				●			●	●	●	●					
Sales tax level depends on vehicle CO ₂ emission level	●					●		●	●					●	●			●
Reduced sales tax for energy efficient vehicles	●			●														
Reduced sales tax for low greenhouse gas emitting vehicles					●													
Tax reduction or tax exemption for electric vehicle purchase				●			●	●		●	●	●					●	●
Reduced annual tax for low CO ₂ emitting vehicles				●	●	●								●				
No annual (road/circulation) tax on battery electric vehicles							●				●	●						
Reduced income tax for private use of company electric vehicles		●									●							●
Additional tax on fossil fuels	●				●													
Subsidy/grant for electric vehicle purchase	●							●		●	●		●					●
Subsidy for installing charging points						●							●					●

La partecipazione alle attività dell'IEA CEM-EVI

La partecipazione ENEA al CEM-EVI è stata avviata formalmente a novembre 2012 con la partecipazione alla riunione del gruppo di lavoro, svoltosi in Germania durante i lavori dell'ExCo IEA HEV. Successivamente si è contribuito alla preparazione di un rapporto tecnico "Global EV Outlook", predisposto per la riunione CEM 4 in India in Aprile; la Figura 523 riporta la statistica delle auto elettriche circolanti e delle infrastrutture di ricarica alla fine del 2012 nei principali paesi del mondo.

Inoltre si è contribuito alla redazione del piano strategico 2013-2014 dell'EVI.

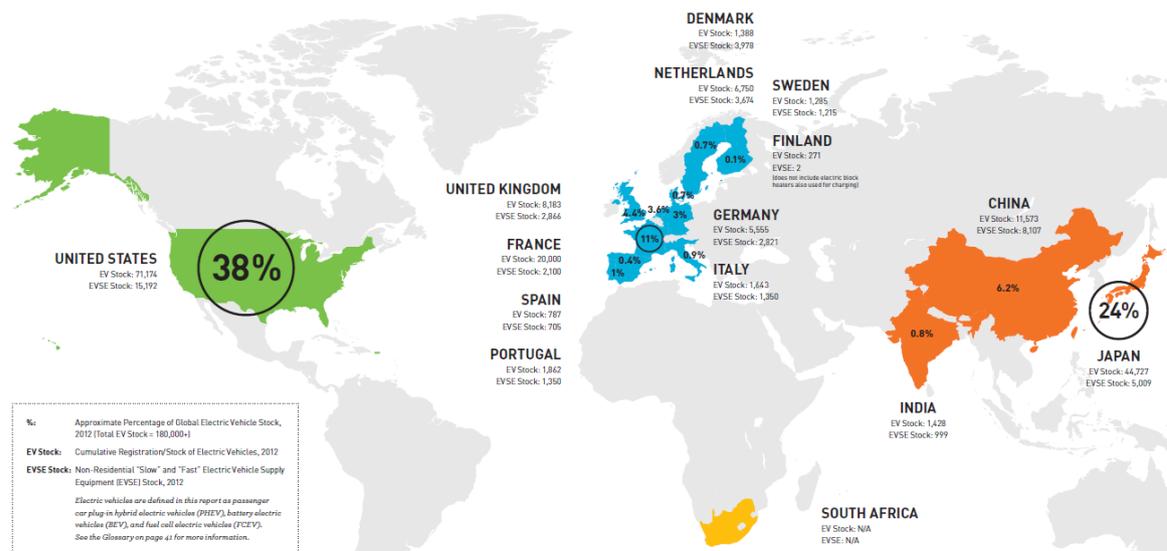


Figura 523. Infrastrutture di ricarica ed auto elettriche alla fine del 2012

b. Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti

E' stato effettuato uno studio sulla mobilità in ambito urbano, di merci e persone, per la valutazione dei consumi energetici conseguente all'elettrificazione del parco veicolare in funzione delle condizioni del traffico, Infatti l'elettrificazione della mobilità comporta importanti ricadute sull'assorbimento di energia dalla rete nel tempo e nello spazio di cui non sono completamente note l'entità e la caratterizzazione. Per far fronte a tale carenza di conoscenza è stato realizzato uno studio sulla mobilità in ambito urbano, merci e persone, con la collaborazione del Centro Trasporti e Logistica (CTL) dell'Università "Sapienza" per gli aspetti relativi al Trasporto Pubblico Locale (TPL) ed alla distribuzione delle merci.

Tale studio è stato condotto su un caso significativo, l'area urbana di Roma, al cui interno sono stati analizzati i comportamenti dei più importanti segmenti di traffico, nella fattispecie il trasporto privato su autovettura, il trasporto pubblico locale e la distribuzione delle merci.

Per il primo insieme, condotto integralmente in ENEA, si sono utilizzati i dati di un periodo adeguato di monitoraggio della flotta veicolare equipaggiata con dispositivi per la rilevazione della posizione dei veicoli a scopi assicurativi, mentre per il TPL e la distribuzione delle merci è stata realizzata un'analisi a partire da indagini pregresse, aggiornate per gli aspetti più rilevanti ai fini dello studio.

Lo studio ha analizzato il carico previsto nelle diverse fasce orarie per tenere conto della variazione giornaliera della domanda di energia, dovuta alle variazioni dell'esercizio del trasporto, oltre che dell'effetto sui consumi energetici dovuto alla variazione giornaliera delle velocità operative.

Si è tenuto inoltre in considerazione, attraverso un'analisi per scenari, dell'evoluzione della domanda di mobilità al 2020 in relazione all'andamento dell'economia e del prezzo dell'energia.

Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani

Lo studio, svolto dall'ENEA (RdS/2013/133), si divide in due parti: la prima svolta integralmente da ENEA relativa allo studio del trasporto individuale, l'altra relativa al trasporto collettivo ed al trasporto merci, in cui l'ENEA ha svolto un ruolo di coordinamento e supporto delle attività realizzate dal Centro Trasporti e Logistica (CTL) dell'Università "Sapienza" per gli aspetti relativi al Trasporto Pubblico Locale ed alla distribuzione delle merci, per i quali sono stati prodotti specifici rapporti (RdS/2013/131 e RdS/2013/132), a cui si rimanda.

Nella prima parte, utilizzando i dati disponibili per un intero mese, di un consistente numero di veicoli della provincia di Roma, è stata fatta una prima analisi sulle percorrenze giornaliere più critiche per verificare la percentuale di veicoli che potrebbero viaggiare in elettrico con la sola ricarica notturna.

Infatti i dati disponibili, provenienti da sistemi GPS, in ambiente veicolare, danno informazioni particolareggiate sull'uso del veicolo sia quotidiano e sia sulla frequenza di utilizzo nei lunghi periodi. Tali informazioni permettono di saper quale è l'utilizzo che effettivamente viene fatto del veicolo dando utili indicazioni sulla possibilità di

sostituire parte del parco veicolare con veicoli elettrici. In Figura 524 sono riportati gli istogrammi della durata soste, con osservazioni per periodi di 1 ora, fatti dalle 7 alle 22, per evidenziare la loro distribuzione nelle diverse ore del giorno. In ascissa è riportata la durate delle soste.

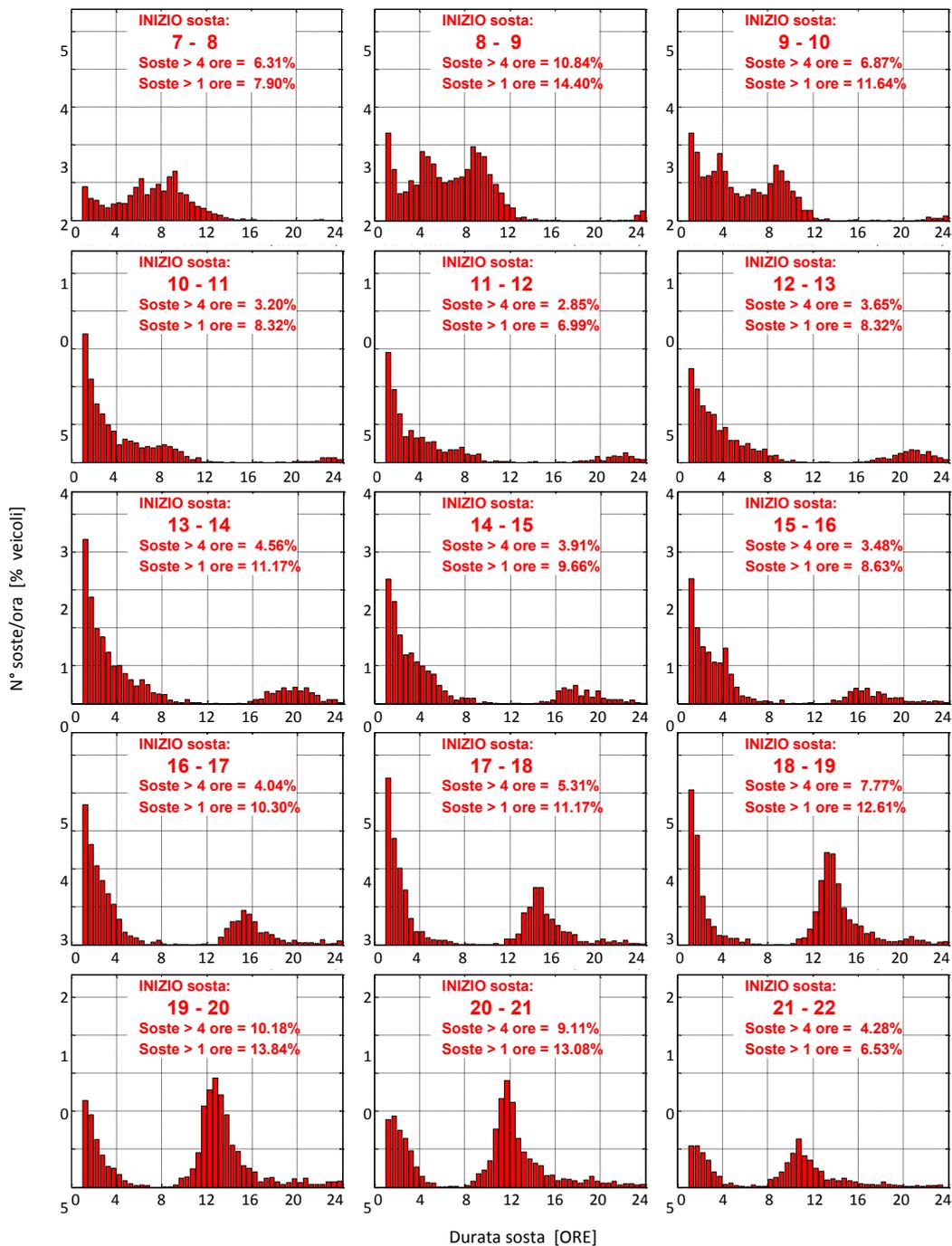


Figura 524. Grafici durata soste

Si è iniziato lo studio individuando 6 classi di VE su cui fare l'analisi. La selezione parte dal più economico quadriciclo elettrico per arrivare al più costoso SUV elettrico.

Nella prima analisi preliminare, si valuta il numero dei veicoli trasformabili in elettrico, con la sola ricarica notturna, quindi senza dipendere dalle colonnine di ricarica. I risultati sono mostrati in Figura 525. In tale figura sono state aggiunte le stesse analisi ripetute, però, ipotizzando la rinuncia del proprio veicolo 1 o 2 volte al mese (nel giorno in cui vengono percorsi più km), ipotizzando che il possesso di un VE cambi in parte il suo uso.

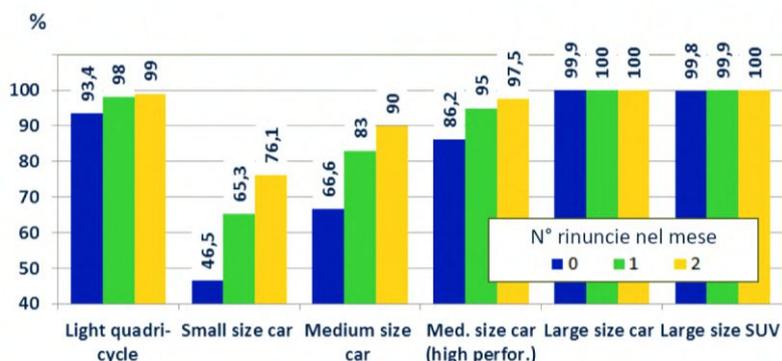


Figura 525. Percentuali di VE che possono circolare senza necessità di ricarica intermedia. Nella 1° colonna quelli senza nessuna rinuncia nel mese, nella 2° colonna quelli con una rinuncia e nella 3° quelli con due rinunce

L'analisi è stata poi ripetuta ammettendo l'uso delle colonnine di ricarica, ipotizzando che i veicoli in circolazione siano tutti elettrici e appartenenti ad una delle sei classi di veicoli predefinite. Viene simulata la ricarica della batteria, secondo 4 diverse modalità di ricarica, per verificare la possibile trasformazione, o meno, in elettrico senza alterare le sue percorrenze ed il suo uso. Se, anche per un solo giorno, il veicolo non è in grado di completare i percorsi giornalieri, viene scartato.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 526 evidenziando la percentuale, per classe, dei veicoli che potrebbero essere convertiti e la percentuale dei chilometri percorsi in elettrico rispetto a quelli di tutti i veicoli. Questa seconda percentuale, a causa della minor percorrenza dei VE, rispetto alla media, risulta inferiore a quella del numero di VE. Come si vede, con la ricarica più frequente, dovuta alle colonnine, aumenta in modo consistente la percentuale di veicoli convertibili, a minor autonomia, come gli "small size" (city car).

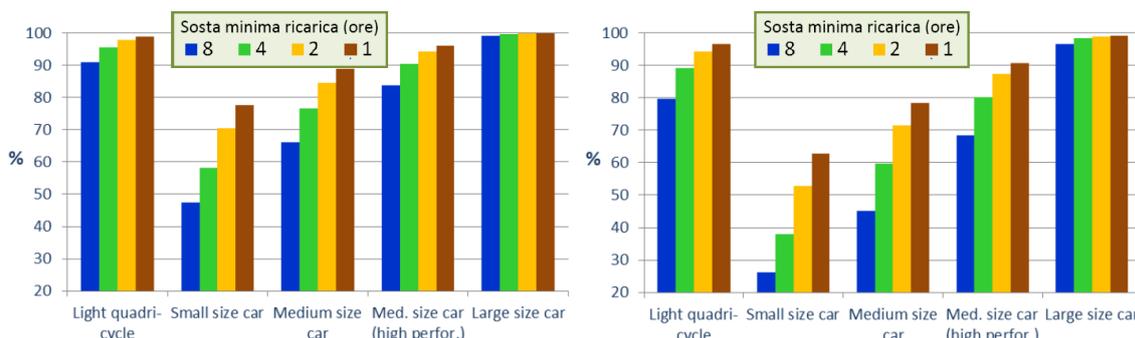


Figura 526. L'istogramma di sx mostra, in base al tipo di ricarica, quale è la % del campione convertibile per ciascuna classe di VE. L'istogramma di dx mostra la percentuale di km che i VE percorrerebbero rispetto a quelli dell'intero campione per ciascuna classe di VE

Nell'analisi sono stati calcolati, in ogni istante, sia le presenze e sia le percorrenze dei veicoli del campione idonei ad essere convertiti in VE. Questi risultati sono mostrati in Figura 527 per la durata di una settimana con la modalità di ricarica fatta con soste di durata superiore alle 8 ore.

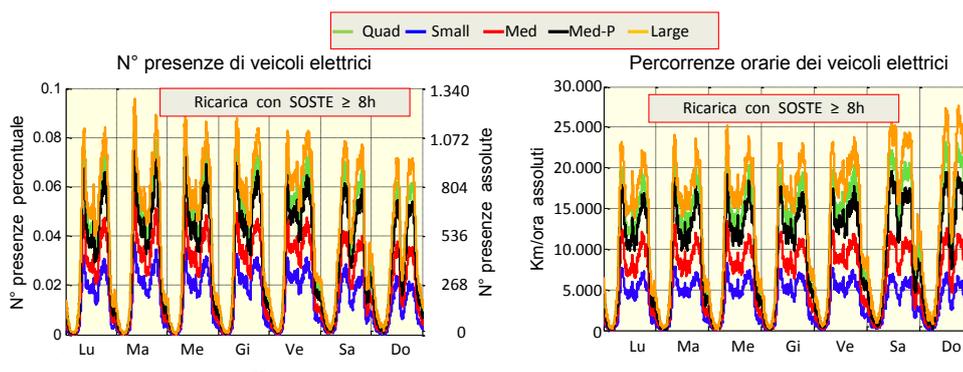


Figura 527. Per 5 classi di VE nel grafico a sx è rappresentato il N° delle presenze dei VE registrate in una settimana. A dx sono rappresentate le relative percorrenze orarie

Infine la conoscenza in dettaglio di queste informazioni ha consentito di estrarre il carico sulla rete distribuito nelle 24 ore.

In Figura 528 sono rappresentati gli assorbimenti dalla rete per ricariche con soste superiori a 8 ore e 1 ora. Dal grafico si nota che per i veicoli "Small" la ricarica con soste di durata > 1 ora rispetto a quella > 8 ore porta ad un notevole aumento delle percorrenze che pur con una più livellata distribuzione conduce ad un discreto aumento dei picchi di potenza.

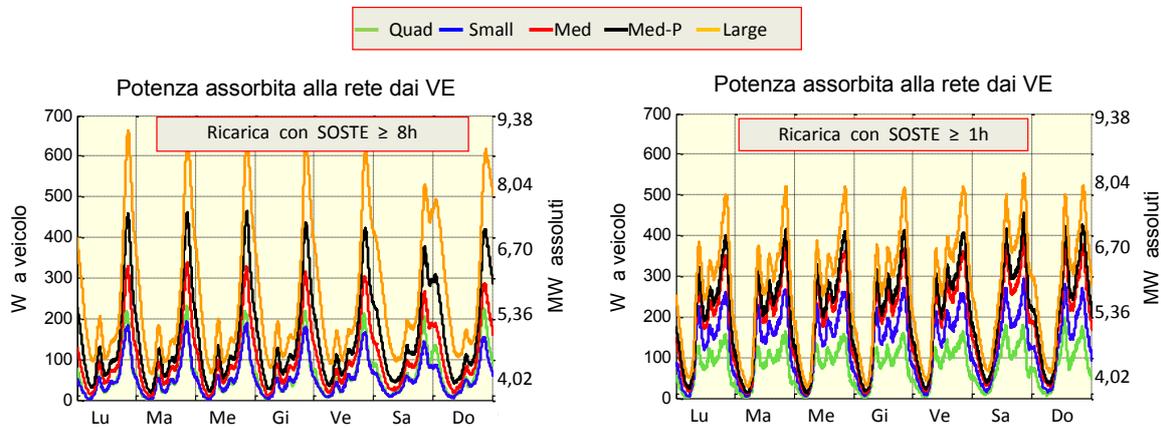


Figura 528. Per 5 classi di VE sono riportate le potenze assorbite dalla rete elettrica per alimentare i VE con le percorrenze ottenute dai VE sottoposti a 2 differenti soste di ricarica

Sempre dagli stessi grafici, si osserva l'elevato assorbimento dei veicoli "Large", rispetto alle altre classi di veicoli. Ciò è dovuto sia al loro maggior consumo e sia alla loro più elevata percorrenza. L'abbassamento dei picchi di potenza che si nota nel grafico di destra, per questa classe di veicoli, è dovuta alle ricariche che sono più frequenti, ma più moderate, e quindi portano ad una miglior distribuzione dell'energia.

Analizzando più nel dettaglio la distribuzione di potenza di una giornata per i VE "Small" in Figura 529 si nota come l'assorbimento, con ricariche per soste > 8 ore tende a concentrarsi in prima serata, mentre con ricariche per soste > 1 ora tende a seguire l'andamento del traffico. L'energia assorbita da rete per soste > 1 ora (curva rossa) è maggiore delle altre modalità di ricarica sia per l'aumentata percorrenza specifica e sia per un maggior numero di veicoli convertiti in VE.

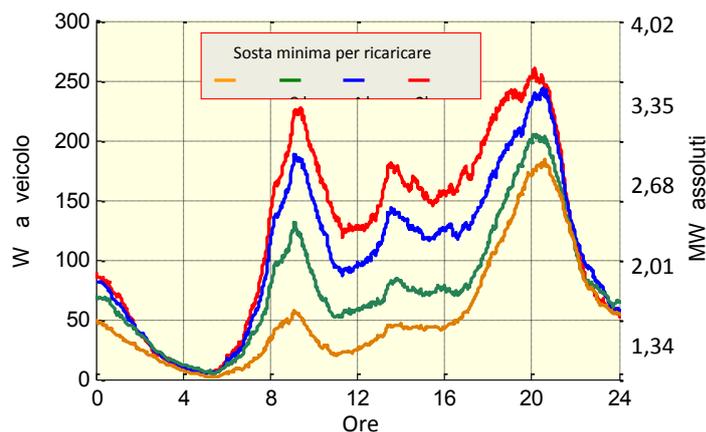


Figura 529. Carico assorbito dalla rete elettrica per alimentare i VE di classe 'Small' con le percorrenze del grafico precedente con le curve dipendenti dalla diversa strategia di ricarica del VE

Lo stesso grafico precedente è riprodotto, in Figura 530 per i VE "Large". In questo caso, cambiando il tipo di ricarica, rimangono invariati sia il numero di conversioni in VE e sia le percorrenze. Pertanto l'energia assorbita dalla rete rimane sempre la stessa indipendentemente dal tipo di ricarica. Perciò le curve, mostrate in figura evidenziano solo la redistribuzione di potenza dovuta alle modalità di ricarica.

La parte qualificante del lavoro svolto è stata quella di aver selezionato un ben preciso campione di veicoli e soprattutto quello di averli messi in relazione con il numero di veicoli immatricolati del comune, calcolandone la percentuale. Ciò consente di fare delle proiezioni sull'intera popolazione di quel territorio.

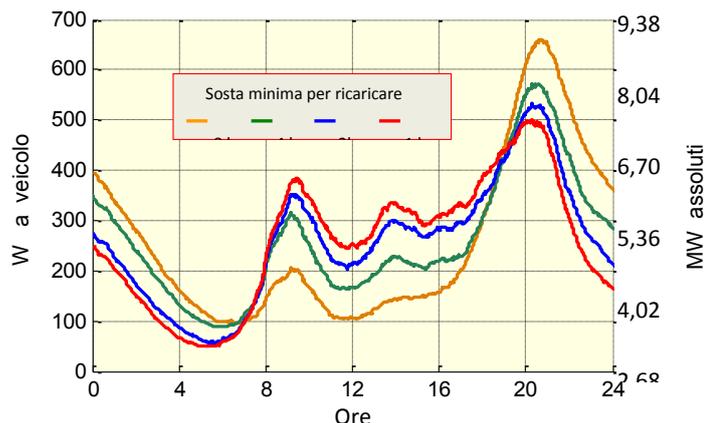


Figura 530. Carico assorbito dalla rete elettrica per alimentare i VE di classe 'Large' con le percorrenze del grafico precedente con le curve dipendenti dalla diversa strategia di ricarica del VE

Le attività relative al trasporto collettivo ed al trasporto merci sono state realizzate in collaborazione con il CTL, in particolare ENEA ha provveduto a fornire al CTL alcuni elementi conoscitivi necessari all'analisi di fattibilità tecnico-economica di scenari di elettrificazione dei servizi di trasporto passeggeri, più specificatamente la declinazione delle caratteristiche prestazionali dei dispositivi di ricarica dei veicoli elettrici plug-in e la stima dei consumi energetici e degli impatti ambientali dei bus per tipologia di alimentazione, tradotti in valore di costo (interno ed esterno).

In relazione a questa azione sono stati presi in considerazione i tempi di ricarica per una batteria Li-ione con supercapacitori in funzione dell'intensità della corrente impiegata rispetto alla capacità C della batteria. Secondo studi pregressi, i tempi in questione variano da 40 min a 185 min, se si prendono in considerazione cariche complete (del tipo corrente costante/tensione costante) eseguite con valori di amperaggio rispettivamente pari a 3C e 0,5C (Figura 531). I corrispondenti rendimenti oscillano fra 0,88 e 0,96, mantenendosi comunque su valori alquanto elevati. Nella prassi, la ricarica rapida dei sistemi di alimentazione dei veicoli elettrici viene eseguita a corrente costante per durate fra 1 h (carica 1C) e 20 min (carica 3C).

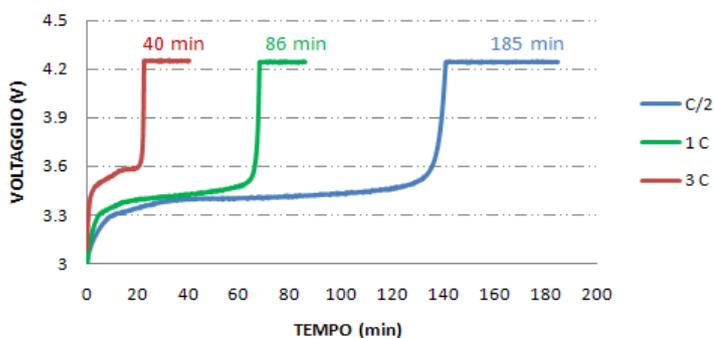


Figura 531. Tempi di ricarica di batteria agli ioni di litio e supercapacitori⁴⁰

In sostanza, i dispositivi di ricarica come quelli esaminati consentono tempi di ricarica diverse volte più bassi rispetto a quelli convenzionali, i cui tempi sono variabili fra le 4 e le 8 ore. Con tali dispositivi, quindi, è possibile effettuare operazioni di ricarica delle batterie di bus elettrici adibiti al trasporto pubblico in corrispondenza dei capolinea, fra una corsa e l'altra (piuttosto che di notte al deposito) con il vantaggio di poter utilizzare batterie di minore capacità e quindi di minore costo, oltre che di minore peso, ottenendo così migliori prestazioni energetiche complessive del veicolo. Infatti, l'energia specifica nominale di un veicolo dotato di ultracapacitori è circa pari al 3% di quella di un veicolo a batterie a litio-ione senza ultracapacitori (3,6 contro 118 Wh/kg). Inoltre, impiegando particolari dispositivi di contatto fra veicolo e rete di distribuzione dell'energia elettrica è possibile effettuare in pochi secondi (15 s circa), compatibili con i tempi di salita e discesa dei viaggiatori, una ricarica dei supercapacitori.

⁴⁰ G. Pedè, Innovative technologies for public transport in Italy, Coiltech, Pordenone, settembre 2013

Una tale soluzione permette di ridurre ulteriormente le capacità energetiche necessarie all'esercizio dei veicoli, anche se i costi di investimento salgono notevolmente a causa delle installazioni necessarie alle fermate.

Il confronto tecnico-economico delle diverse soluzioni è oggetto delle attività svolte dal CTL della Sapienza, illustrate nel seguito. Per quanto riguarda la caratterizzazione energetica ed ambientale delle diverse soluzioni tecnologiche dei veicoli adibiti al trasporto pubblico si è proceduto come descritto di seguito.

I consumi energetici specifici dei bus urbani (diesel, elettrici ed a metano) sono stati desunti da rilevazioni su strada effettuate da ENEA nel corso di precedenti attività mentre per le emissioni in atmosfera dei principali inquinanti si è fatto riferimento all'inventario nazionale dei consumi e delle emissioni del trasporto stradale, emesso annualmente dall'ISPRA e attualmente aggiornato all'anno 2010.

Per quanto riguarda invece i consumi e le emissioni della fase *upstream* del ciclo energetico le fonti esaminate sono state: nuovamente ISPRA per quanto concerne i consumi e le emissioni della produzione di energia elettrica; Concawe e Federmetano per la quantificazione, rispettivamente, dei consumi energetici e delle emissioni in atmosfera della raffinazione e trasporto dei combustibili fossili (diesel e metano).

Il confronto ha portato a concludere che, mentre il consumo alle ruote di un bus elettrico è circa un quarto di quello di un diesel, sull'intero ciclo di vita della fonte energetica il rapporto fra i due tipi di veicoli raggiunge lo 0,4% circa; tuttavia, nel caso del motore a combustione interna l'energia consumata è tutta di origine fossile mentre nel caso dell'elettrico incide una quota parte di energia rinnovabile che attualmente, per il parco elettrico italiano, è pari al 28% circa ed è destinata ad aumentare rapidamente, grazie alle politiche comunitarie e nazionali in tal senso.

Con riferimento ai costi operativi dell'energia, ogni km percorso da un bus alimentato a gasolio costa alle aziende di trasporto pubblico poco più di 36 cent/km, nel caso dei bus elettrici tale valore scenderebbe a 16 cent/km, con un risparmio monetario di circa 55%.

Riguardo agli aspetti ambientali, un bus diesel produce circa 0,9 g CO₂/km (sul ciclo di vita del combustibile), a fronte di poco più di 0,65 g CO₂/km di un veicolo alimentato elettricamente; considerando anche le altre sostanze nocive più importanti (particolato e ossidi di azoto), i costi esterni legati alle emissioni in atmosfera, calcolati utilizzando coefficienti di costo riconosciuti a livello europeo, risultano pari a circa 13 cent/km per il veicolo diesel e a circa 2 cent/km per quello elettrico, avendo considerato l'incidenza della fase di produzione e distribuzione dell'energia.

Scenari di elettrificazione della rete di trasporto pubblico a Roma - Il fabbisogno energetico

Il lavoro ha avuto per oggetto lo studio della fattibilità tecnico economica dell'elettrificazione di parte della flotta di veicoli stradali per il trasporto pubblico e del conseguente fabbisogno energetico (rapporto RdS/2013/131).

Lo studio è stato affrontato dapprima dal punto di vista teorico, con la formulazione matematica del problema, la definizione dell'algoritmo risolutivo e la messa a punto del metodo di stima dei consumi per diverse tipologie di flotta veicolare; lo studio metodologico è stato quindi integrato con l'applicazione a due casi di studio, introducendo alcuni scenari di elettrificazione a batteria delle linee, con differenti ipotesi di tecniche di ricarica, tradizionale o rapida delle batterie.

Il modello è stato applicato in un caso di studio ad una significativa porzione della rete di trasporto pubblico di superficie della città di Roma, suddivisa in due bacini, gravitanti rispettivamente su via Tiburtina e su largo di Torre Argentina. Si sono ipotizzati diversi scenari in base alla tipologia di esercizio (ricarica rapida alle fermate, ricarica ai soli capilinea), alla composizione della flotta (tutte le linee a combustione interna, tutte a trazione elettrica o composizione mista) ed ai diversi parametri funzionali (tempi di ricarica, capacità della batteria, potenze di ricarica). Infine si è operata un'ottimizzazione dei diversi parametri tramite un algoritmo genetico, applicato solamente agli scenari che sono risultati più convenienti.

La Tabella 117 riassume il confronto fra lo scenario di riferimento BAU (esercizio delle linee con veicoli diesel) e scenari in cui si prevede la parziale o totale elettrificazione del servizio (per singole linee); in particolare gli scenari indicati con la lettera B prevedono la ricarica ultrarapida sulla metà delle fermate mentre quelli contrassegnati con la lettera C corrispondono ad uno scenario di ricarica rapida ai soli capilinea (biberonage); le cifre 1, 2 e 3, invece, indicano il numero di linee soggette ad elettrificazione (rispettivamente 4, 7 o 10 linee). I risultati si riferiscono al caso di studio del bacino Tiburtina a Roma (10 linee, 432 fermate, 127 km di linee, velocità commerciale nell'ora di punta circa 16 km/h per circa 5.700 pass/h).

La Tabella 117 riporta il dettaglio delle singole voci di costo considerate, stimate su 15 anni di esercizio ed attualizzate, e dei consumi elettrici in un giorno feriale medio.

Gli scenari considerati comportano generalmente una riduzione dei costi totali pluriennali, riportabile ad una drastica riduzione dei costi energetici ed ambientali.

Lo scenario di ricarica ultrarapida alle fermate risulta più redditivo di quello che prevede il biberonage al capolinea; infatti, anche se quest'ultima configurazione potrebbe sembrare conveniente dal punto di vista degli investimenti poiché si azzerano le apparecchiature in linea, tuttavia, per le linee il cui tempo di ricarica eccede l'intertempo, è necessario acquistare nuovi veicoli per mantenere la frequenza e questo implica un aumento dei costi tale da annullare il beneficio precedentemente ottenuto.

Tabella 117. Confronto economico scenari di analisi. Risultati e confronti tra gli scenari B e C con lo scenario BAU

Scenario	Unità	BAU	B			C		
		–	1	2	3	1	2	3
nfa	[fermate attrezzate]	0	63	130	218	0	0	0
nK	[veicoli]	95	91	91	97	93	101	122
Consumi	[kWh/giorno]	0	3.305	15.711	41.172	4.810	22.866	59.921
Costi Ambientali	[M€/15 anni]	12,531	11,576	10,655	1,945	11,576	10,655	1,945
Costi energia		60,462	56,268	41,572	12,016	57,113	45,622	22,357
Investimenti		20	28,215	38,195	53,335	23,367	36,364	53,403
Costi Manutenzione		1,114	1,571	2,128	2,971	1,909	2,633	3,867
Costi rumore		8,805	7,936	5,334	0,146	7,936	5,334	0,146
Costi Personale		147,493	143,31	143,31	153,34	145,82	157,94	193,04
Costo Utenza		3.423,7	3.570,9	3.570,9	3.315,5	3.570,9	3.570,9	3.315,5
Costo totale		250,41	248,88	241,2	223,76	242,88	248,77	266,78

Come è facile osservare dalla tabella il trend di costo nell'aggiunta delle linee equipaggiate con veicoli BEV è inverso tra la classe B e la classe C: all'aumentare del numero delle linee attrezzate con lo scenario di classe B il costo globale si riduce, in virtù del risparmio ottenuto su un maggior numero di linee; diversamente, lo scenario di classe C rileva un costo crescente con l'aumento delle linee BEV a causa del maggior numero di veicoli da acquistare.

Questa è la motivazione principale per la quale si è scelto di operare un'ottimizzazione tramite algoritmo genetico sui soli scenari che prevedono la ricarica ultra-rapida alle fermate, nell'ipotesi di esercizio con veicoli elettrici su 4, 7 o 10 linee. I risultati dell'ottimizzazione sono riportati nella Tabella 118, in cui con l'acronimo GA si intende uno scenario di progetto fermate attrezzate in numero variabile (infatti il numero di fermate da attrezzare per la ricarica è uno dei risultati dell'ottimizzazione) mentre le cifre 1, 2 e 3 indicano, come prima, il numero di linee elettrificate sulle 10 totali (4, 7, 10).

Come si può osservare dalla Tabella 118, gli scenari ottimizzati tramite algoritmo genetico sono tutti migliori della situazione BAU e, inoltre, la convenienza complessiva aumenta al crescere delle linee elettriche, come evidenziato dalla riduzione valore attuale netto (NPC) passando dallo scenario di riferimento (BAU) allo Scenario 1 e poi allo Scenario 3.

In sostanza la ricerca ha dimostrato che l'elettrificazione della flotta può produrre una riduzione piuttosto marcata (attorno al 20%) dei costi netti attualizzati su quindici anni di esercizio, in particolar modo per le voci di costo relative all'energia consumata ed alle emissioni atmosferiche (–85%) ed acustiche (–100%). Ovviamente a causa dell'elevato costo dei veicoli elettrici e delle relative apparecchiature i costi d'investimento risultano essere molto maggiori (+150%) della situazione di riferimento, di rinnovo della flotta con veicoli a combustione interna.

Tabella 118. Risultati per gli scenari ottimizzati

Scenario	Unità	BAU	GA			
			1	2	3	
Indicatore		-				
nfa	-	0	29	104	216	
nK	[veicoli]	95	85	85	91	
Consumi	[kWh/giorno]	0	3 245	15 425	40 422	
Costi Ambientali	[M€/15 anni]	12,531	11,576	10,655	1,945	
Costi energia		60,462	56,106	41,082	10,762	
Investimenti		20	24,788	34,389	49,717	
Costi Manutenzione		1,114	1,381	1,915	2,769	
Costi rumore		8,805	7,936	5,334	0,146	
Costi Personale		147,493	133,29	133,29	143,31	
Costo Utenza		3.423,7	3.560,1	3.560,1	3.305,2	
Costo totale			250,41	235,07	226,66	206,66

L'analisi del fabbisogno energetico nell'arco della giornata ha evidenziato come i consumi siano maggiormente elevati tra le 7 e le 18, con valori massimi di circa 1600 kWh/h e 3500 kWh/h e variazioni del 24% e del 14%, rispettivamente per il bacino Tiburtina e per quello di Torre Argentina.

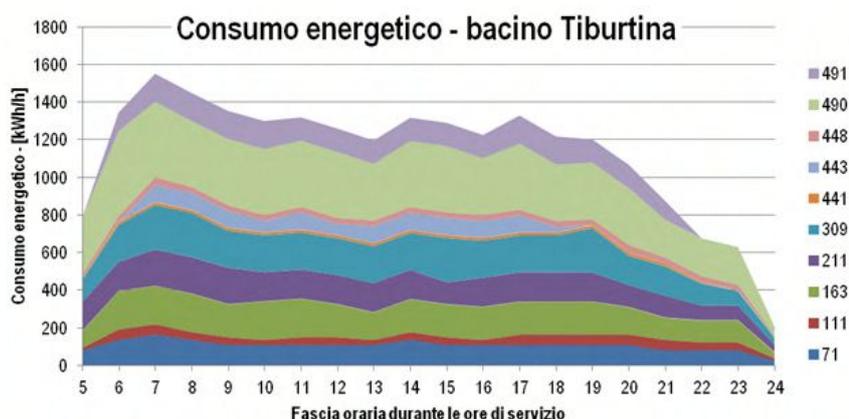


Figura 532. Fabbisogno energetico giornaliero Bacino Tiburtina

Infine, ai fini del dimensionamento delle sottostazioni di alimentazione elettrica, è stata effettuata un'analisi della potenza assorbita ai capolinea durante la ricarica, ipotizzando di aggregare le linee elettriche in 15 capolinea attrezzati per la ricarica rapida, distribuiti sul territorio, con assorbimenti variabili da 50 kW a 400 kW, in funzione del numero e della frequenza delle linee in attestamento.

Scenari di elettrificazione della distribuzione urbana delle merci a Roma - Il fabbisogno energetico

Il lavoro ha avuto per oggetto lo studio della fattibilità tecnica e del fabbisogno energetico conseguente all'introduzione di un servizio di distribuzione logistica urbana mediante una flotta di veicoli elettrici a batteria (rapporto RdS/2013/132).

Nello studio viene dimensionato e simulato un sistema di distribuzione delle merci nel Tridente del Centro storico di Roma. Per simulare uno scenario realistico di realizzazione del sistema nel breve periodo, si è immaginato di introdurre il sistema di distribuzione per la sola categoria degli esercizi della ristorazione, che attualmente sono destinatari di circa 450 t di merce al giorno, ipotizzando un'adesione al servizio da parte del 60% degli esercenti.

Al fine di ottenere un quadro di riferimento del fabbisogno elettrico abbastanza ampio e non limitato esclusivamente alla distribuzione di prossimità, che nei Centri storici viene effettuata tipicamente con veicoli di piccole dimensioni, sono stati analizzati due differenti scenari alternativi: uno scenario A, in cui la distribuzione avviene

con veicoli elettrici di medie dimensioni, aventi una portata di 7 t, a partire da tre depositi alla periferia dell'area urbana, ed uno scenario B, in cui si prevede la realizzazione di 10 transit point in prossimità della zona a traffico limitato, a servizio della distribuzione effettuata con veicoli di dimensioni medio-piccole, aventi portata di 3,5 t. Lo scenario B ha una maggiore valenza trasportistica, mentre lo scenario A serve ad ottenere una stima del fabbisogno energetico nel caso di realizzazione di un sistema di distribuzione su scala urbana ampia.

I risultati ottenuti evidenziano come la realizzazione di uno schema di distribuzione nell'ultimo miglio con transit point di prossimità (scenario B) consenta di servire, nel Centro storico di Roma, circa 140 esercizi della ristorazione su un'area di circa 1,7 km², con la distribuzione a destinazione di circa 140 tonnellate di merce entro un tempo di circa 4 ore, utilizzando una flotta di 19 veicoli elettrici della portata di 3,5 tonnellate, che compiono 94 giri, percorrendo complessivamente circa 240 km. Il consumo elettrico complessivo in tale scenario è di circa 137 kWh/giorno. Ogni veicolo percorre mediamente 12,7 km al giorno e consuma in media circa 7 kWh, valori ampiamente compatibili con l'autonomia delle batterie, per le quali si può assumere la ricarica notturna.

Nello scenario A, che prevede la realizzazione di 3 depositi periferici, la stessa domanda e la stessa area vengono servite con veicoli aventi portata di 7 t, con un minor numero di giri, pari a 23, ma con percorrenze comunque maggiori, di circa 1100 veic-km. Il consumo energetico complessivo in questo scenario è di circa 1 200 kWh/giorno. Ogni veicolo copre in media circa 47 km nelle 5:43 ore di servizio e consuma circa 52 kWh/giorno. Il pacco batterie dovrà essere dimensionato opportunamente, per consentire lo svolgimento del servizio senza ricarica in punti localizzati nell'area di consegna o nel ritorno al deposito.

Per avere un'idea della rilevanza del consumo complessivo della distribuzione merci rispetto ad altri segmenti del trasporto urbano, si consideri che i consumi energetici dello scenario di elettrificazione del trasporto pubblico nel bacino Tiburtina (10 linee di bus con ricarica ai capolinea), simulato nella precedente fase di studio (cfr. rapporto RdS/2013/131), risultano pari a circa 60000 kWh/giorno, di gran lunga superiori a quelli richiesti per la distribuzione urbana, sia nello scenario A (circa 1200 kWh/giorno) sia, a maggior ragione, nello scenario B (150 kWh/giorno).

L'analisi di sensibilità al variare della domanda evidenzia come, ferme restando la struttura spaziale della domanda e la struttura dell'offerta (numero di depositi e tipo di veicolo), le variabili che risentono maggiormente del fattore di scala sono il numero di veicoli, il numero di giri ed il coefficiente di utilizzazione temporale dei veicoli, mentre i consumi specifici, dipendendo dalla tipologia di veicolo, rimangono pressoché invariati in ciascuno scenario.

In definitiva, l'introduzione di servizi di distribuzione delle merci con veicoli elettrici e transit point di prossimità richiede semplicemente l'installazione di dispositivi di ricarica notturna all'interno dei transit point, senza particolari vincoli di durata per la ricarica e senza intralciare l'operatività dei veicoli.

Nel caso di studio esaminato (scenario B), che coinvolge un'ampia area del centro storico di Roma ma solo per una categoria di esercizi commerciali (equivalente al 6% circa della domanda complessiva di approvvigionamento), l'assorbimento giornaliero di energia elettrica risulterebbe alquanto modesto (circa 150 kWh/giorno) e la potenza installata necessaria nel complesso, immaginando un tempo di ricarica dei veicoli pari a 8 ore, inferiore ai 20 kW.

c. Sviluppo dei processi di produzione e caratterizzazione di componenti strutturali innovativi per la riduzione del peso dei veicoli a trazione elettrica

Le attività a termine dell'obiettivo c sono state la continuazione delle attività svolte nel corso dei due precedenti PAR (2008-2009 e 2011) inerenti lo sviluppo di materiali leggeri a base di schiume e di specifici sistemi per la realizzazione di materiali compositi e metodologie di giunzione.

In sintesi, nel corso del PAR 2012, a partire dai risultati ottenuti nella scorsa annualità sullo sviluppo di apparecchiature e processi per la realizzazione di estrusi di alluminio rinforzati, sono state sviluppate e parzialmente ottimizzate delle nuove miscele di polveri eutettiche originali ed i processi di compattazione per la realizzazione di precursori di schiume metalliche di alluminio utilizzabili nello sviluppo di componenti di alluminio rinforzati le cui principali attività e risultati verranno di seguito riassunte (rapporto RdS/2013/098).

Allo stesso modo è stata rinnovata la collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale, gruppo Metallurgia, dell'Università Roma Tor Vergata per quanto riguarda lo studio dei processi e la realizzazione di compositi pelle-precursore-pelle mediante compattazione per pressatura e/o laminazione.

L'Università Roma Tor Vergata ha sviluppato un metodo di realizzazione di precursori compositi acciaio-schiuma di alluminio-acciaio con l'impiego di adeguate paste disossidanti e pressatura a freddo realizzando prototipi di dimensione fino a 100 mm x 100 mm. Le fasi di sviluppo, descritte nei dettagli nel rapporto RdS/2013/099 sono di seguito sintetizzate.

Infine, sono stati realizzati alcuni campioni prototipali che simulano la giunzione fra pannelli AFS commerciali ed estrusi che possono essere impiegati per la realizzazione di pavimenti imperiali, pareti di carrozze ferroviarie con l'impiego di tecniche di saldatura laser innovative ed è stata allestita una stazione di saldatura Plasma Keyhole per approfondire le potenzialità di tecniche di saldatura ad elevata efficienza energetica sui materiali a base di alluminio (rapporto Rds/2013/100).

Ottimizzazione dei parametri di compattazione ed estrusione di precursori originali per schiume di alluminio (

Uno dei problemi principali per la realizzazione di compositi ed in particolare di estrusi rinforzati con schiume di alluminio è l'accoppiamento fra componente bulk in lega di alluminio e precursore di schiuma. Il lavoro svolto può essere sintetizzato in 5 fasi:

- Scelta e definizione delle modalità di preparazione delle leghe per precursori a basso punto di fusione;
- Upgrading delle attrezzature per la compattazione;
- Studio delle procedure di compattazione ed analisi dei risultati.
- Schiumatura dei precursori sviluppati ed analisi dei risultati.
- Realizzazione di estrusi rinforzati.

Scelta e definizione delle modalità di preparazione delle leghe per precursori a basso punto di fusione

Per quanto riguarda la scelta delle miscele sulla base degli ultimi studi di letteratura sono state definite due leghe a base di Al-Si, uno dei principali sistemi eutettici delle leghe di alluminio. In particolare sono state prese in considerazione una lega ternaria ed una quaternaria.

- $AlMg_4Si_8$ (Lega ternaria a base di silicio e magnesio)
- $AlMg_4Si_8Cu_4$ (Lega quaternaria con silicio, magnesio e rame).

Queste due leghe si candidano come leghe in grado di ottimizzare la distribuzione delle porosità in quanto studi sistematici di letteratura riportano che leghe di alluminio con tenori di silicio intorno al 7% permettono una distribuzione più omogenea di porosità rispetto alle leghe eutettiche $AlSi_{12}$ mentre la riduzione di intervallo di fusione (TS: temperatura solido; TL: temperatura liquido) viene garantita dall'aggiunta di magnesio e rame.

Le miscele di polveri sintetizzate nella Tabella 119 sono state ottenute utilizzando un sistema di miscelazione/macinazione ("ball milling") completamente caratterizzato in ENEA.

Tabella 119. Composizione delle miscele di polveri per la produzione di precursori

Tipo di polvere	Quantità in grammi	
	$AlMg_4Si_8$	$AlMg_4Si_8Cu_4$
Aluminium Silicon Powder, -325 mesh 99% Al:Si; 88:12 Wt%	100	100
Aluminium Powder -40+325 mesh 99,8%	44	38
Magnesium powder, -20+100 mesh 99,8%	6	6
Copper powder -150 mesh 99%	0	6
Agenti additivi nucleante e schiumante		
Silicon Carbide fine 320 grit	6	6
TiH ₂ - 325 mesh	3	3

Le miscele di polveri realizzate sono state sottoposte ad un'analisi dettagliata mediante microscopia elettronica a scansione, appropriati cicli di calorimetria differenziale a scansione e diffrattometria raggi X in modo da valutare la distribuzione morfologica e l'azione di alligazione a stato solido e miscelazione delle polveri. La fase di macinazione viene infatti ritenuta estremamente importante al fine di ottenere una distribuzione omogenea ed uniforme degli elementi di lega e degli agenti schiumanti.

Nelle figure seguenti sono riportate l'analisi SEM e l'analisi DSC del campione di polveri $AlMg_4Si_8Cu_4$ dopo macinazione complessiva per 49 min a 800 rpm.

L'analisi SEM (Figura 533) mettono in evidenza la morfologia delle polveri, la loro tendenza a formare o meno agglomerati e, confrontando le polveri con quelle originali, l'entità dell'effetto del ball milling.

Le analisi DSC in Figura 534 mostrano la differenza fra i picchi rilevati in un primo ciclo di riscaldamento (1^a Salita) ed in quello successivo. La differenza nei picchi di temperatura mostra l'effetto della fusione nella realizzazione di miscele eutettiche che hanno un intervallo di temperature di fusione traslato più in basso.

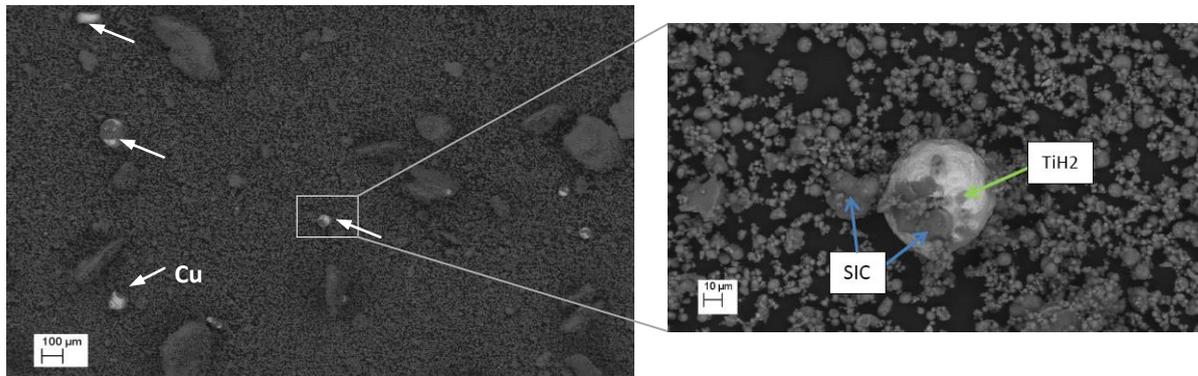


Figura 533. Immagine SEM della miscela di polveri $AlMg_4Si_8Cu_4$ - 1% TiH_2 - 2% SiC con particolare su una particella di rame

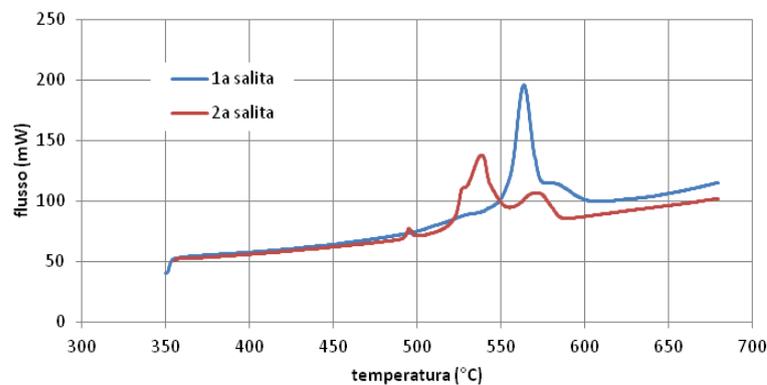


Figura 534. Analisi DCS del campione di polveri $AlMg_4Si_8Cu_4$ - 1% TiH_2 - 2% SiC

Upgrading delle attrezzature per la compattazione

La compattazione di polveri dure di leghe di alluminio, in particolare di quelle a base $AlSi$ comporta la necessità di introdurre un riscaldamento delle matrici in quanto pur utilizzando pressioni elevate (450 MPa) la densità raggiunta dai precursori era inferiore al 90%. Questo ha imposto l'introduzione di adeguati sistemi di riscaldamento e la modifica delle matrici di compattazione ed estrusione e lo sviluppo di adeguati sistemi di monitoraggio sia della temperatura sia della pressione esercitata.

In sintesi la matrice di compattazione di diametro 30 mm è stata implementata con un riscaldatore anulare da 1000 W che, opportunamente coibentato, consente di effettuare test con matrice di pressatura riscaldata fino a temperatura di 350 °C. Per la matrice di compattazione ed estrusione di diametro 50 mm, considerati gli spessori in gioco del mantello di pressatura, il sistema di riscaldamento ideato è stato di tipo differente prevedendo l'introduzione dei riscaldatori in modo radiale interni al mantello.

Le Figure 535 e 536 illustrano gli upgrading inerenti il sistema di riscaldamento che sono stati necessari al fine di raggiungere le densità dei precursori necessarie alla successiva schiumatura.

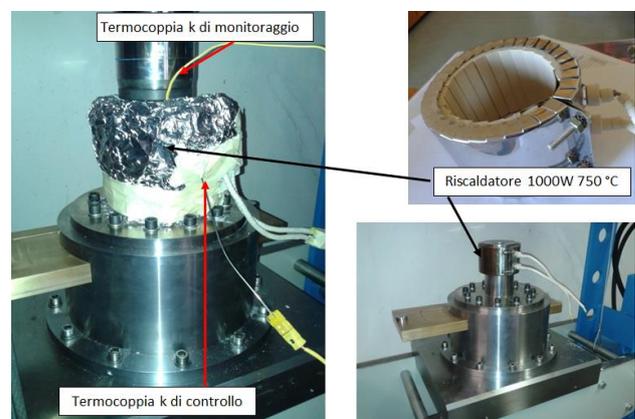


Figura 535. Upgrading della matrice di pressatura uniaassiale di diametro 30 mm

Studio delle procedure di compattazione ed analisi dei risultati

Per le procedure di compattazione sono stati effettuati due piani sperimentali paralleli sulle due miscele di polveri considerate.

Infatti, il raggiungimento della densità apparente desiderata, a parità di parametri di compattazione: temperatura, pressione e velocità (intesa come durata della compattazione e numero di cicli di pressatura) dipendono anche dalla miscela dei polveri utilizzata in termini di granulometria e di fenomeni reologici che si sviluppano fra i differenti tipi di polveri utilizzate. Come meglio descritto nel rapporto RdS/2013/098, il corretto mixing fra polveri dure e duttili e granulometria delle stesse influenza i parametri di compattazione.

Per entrambe le miscele di polveri, la cui densità teorica è riportata in Tabella 120, sono stati considerati tre fattori: temperatura, pressione e cicli di carico e due livelli per un piano fattoriale completo di otto test ciascuno. Il piano fattoriale completo ripetuto per le due miscele di polveri è riportato in Tabella 537.

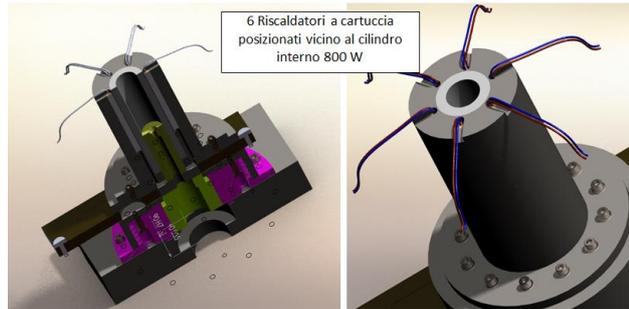


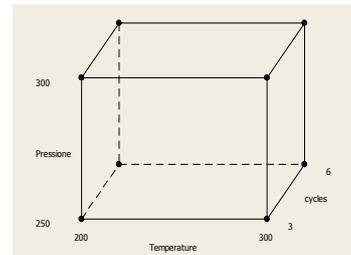
Figura 536. Upgrading della matrice di pressatura/estrazione uniaassiale di diametro 50 mm

Tabella 120. Densità teorica leghe sviluppate per precursori a basso punto di fusione

$Al Mg_4 Si_8$	$Al Mg_4 Si_8 Cu_4$
2,635 g/cc	2,885 g/cc

Tabella 121. Piano fattoriale completo - 3 parametri, 2 livelli

Fattore	Temperatura	Pressione	Ciclo di carico
Basso	200 °C	250 MPa	3
Alto	300 °C	300 °MPa	6



Per ogni esperimento sono state monitorate la temperatura e la pressione dei vari cicli. Il ciclo di pressione è avvenuto sempre in due step: una pressione iniziale pari al 50% delle pressione di prova ripetuta per 2 cicli di 5 minuti ciascuno; una successiva fase con l'applicazione della pressione massima di prova con 3 o 6 cicli di carico ripetuti ad intervalli di 5 minuti. L'ultimo ciclo di carico viene fatto permanere per 15 minuti prima dello scarico definitivo del compattato.

La Figura 537 mostra due delle varie sequenze di compattazione con 3 e 6 cicli di pressatura. In particolare il primo grafico si riferisce alla partenza con pressa a freddo per cui il ciclo reale inizia solo dopo circa 35 minuti al raggiungimento della temperatura di prova di 300°C.

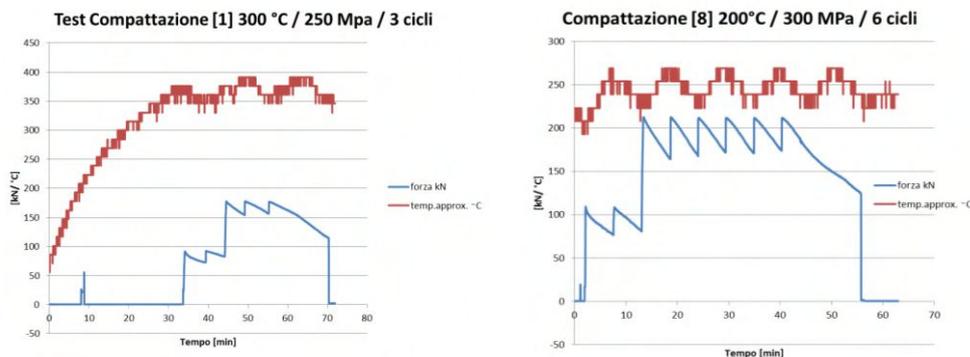


Figura 537. Esempi di cicli di carico

L'analisi effettuata mostra come i due parametri che mediamente influenzano maggiormente la densità del precursore $AlMg_4Si_8Cu_4$ sono: temperatura e numero di cicli. Il livello di pressione è invece molto meno influente.

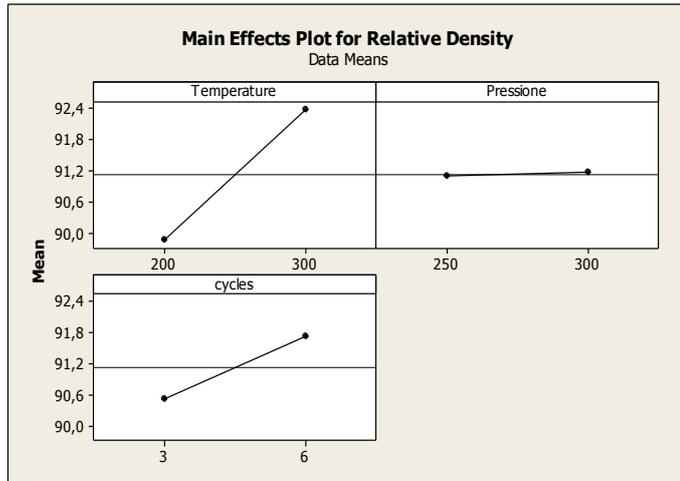


Figura 538. Influenza dei parametri di prova per la miscela $AlMg_4Si_8Cu_4$

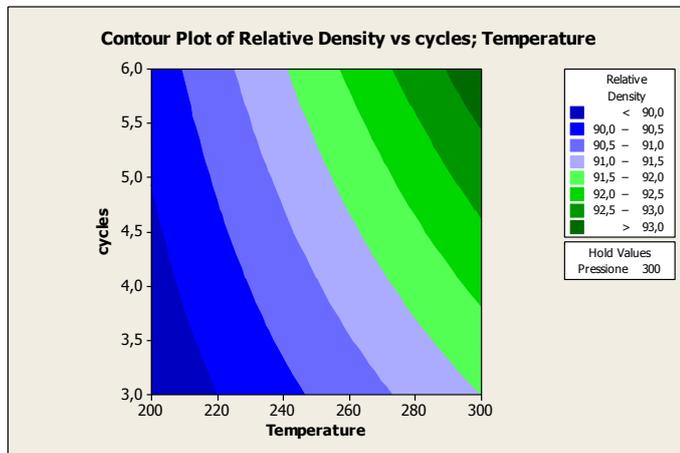


Figura 539. L'interpolazione dei dati di densità relativa in funzione di temperatura e numero di cicli per la miscela $AlMg_4Si_8Cu_4$

Un risultato inaspettato è che i precursori della miscela $AlMg_4Si_8$ raggiungono a parità di parametri di compattazione una densità relativa molto più elevata rispetto a quelli della miscela con l'aggiunta di rame (Figura 540).

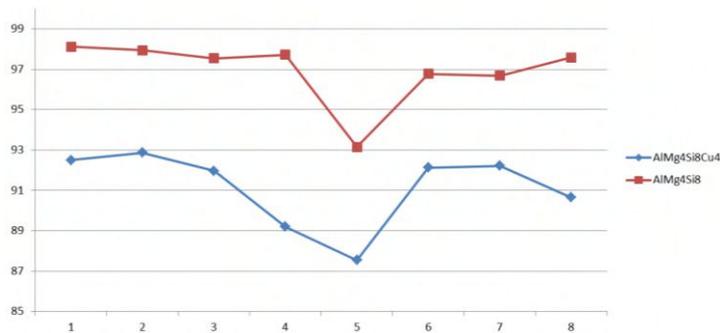


Figura 540. Comparazione fra densità relative dei due differenti campioni di polveri macinate

Alcuni dei precursori, in particolare quelli ottenuti nelle condizioni minime, massime ed intermedie sono stati sottoposti ad analisi SEM/EDS e DSC per l'analisi microstrutturale del processo di compattazione. In particolare, tutti i precursori riportati in Tabella 122 sono stati sottoposti ad analisi SEM mentre per due campioni sono state realizzate delle lamine di circa 1 m di spessore per le prove DSC.

Tabella 122. Precursori utilizzati per analisi DSC e SEM

Temperatura	Pressione	Cicli	AlMg ₄ Si ₈	ID
300	300	6	11	
300	300	3	10	
200	250	3	13	ID
Temperatura	Pressione	Cicli	AlMg ₄ Si ₈ Cu	
300	250	3	1	
200	300	6	6	
200	300	6	8	

La Figura 541 riporta il confronto, allo stesso ingrandimento, dei precursori di AlMg₄Si₈ ed AlMg₄Si₈ Cu₄.

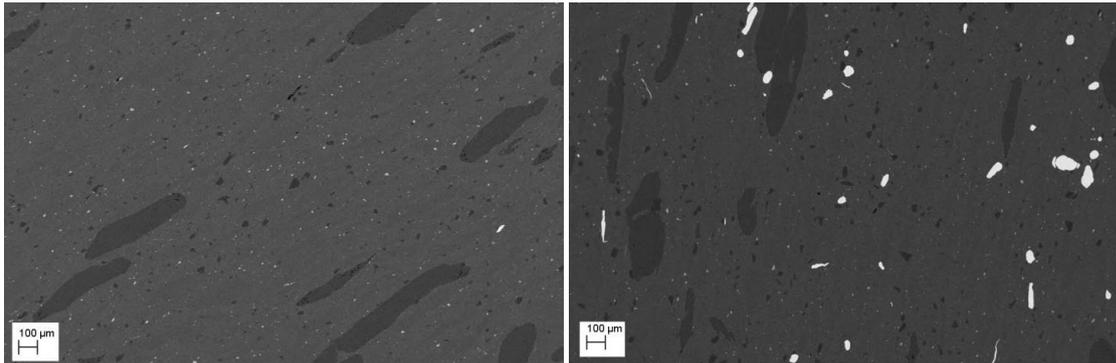


Figura 541. Confronto fra campione 10 (sx) e precursore 1 (dx)

Le particelle più grandi in grigio scuro con contorni smussati sono di magnesio, mentre le particelle scure piccole a spigoli vivi sono SiC che risulta in entrambi i casi ben distribuito allo stesso modo delle puntinature chiare che sono prevalentemente TiH₂. Le particelle chiare più grandi e tondeggianti rappresentano invece le particelle di rame e sono presenti solo sul campione 1. L'analisi EDS di altre particelle aciculari chiare, la cui presenza risulta comunque molto limitata, ha mostrato che sono ricche di ferro e cromo per cui molto probabilmente sono dovute ad un inquinamento della miscela da parte dei materiali delle sfere e delle lame utilizzate per il ball milling.

Le differenze in densità sono evidenziate anche dalle immagini SEM a maggiore ingrandimento riportate in Figura 542 dove è possibile osservare come: per il campione 8 (AlMg₄Si₈Cu) la presenza di cavità residue fra i granuli di AlSi12 sia maggiore rispetto al campione 13 (AlMg₄Si₈) che, pur raggiungendo una densità relativa del 93,1% contro il 90,6% del campione 8, risulta il campione a base della lega ternaria ad avere il minor livello di compattazione.

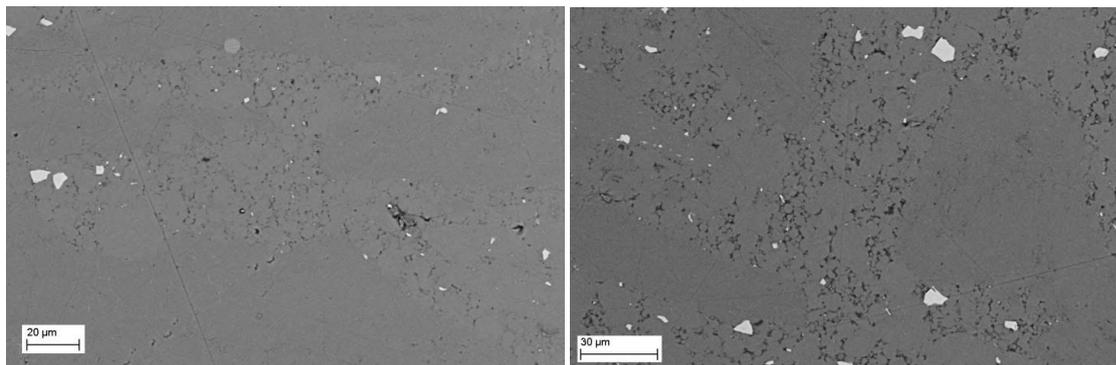


Figura 542. Confronto fra campione 13 (sx) e precursore 8 (dx)

Le prove DSC sono state condotte per verificare la reale formazione di leghe ed osservare le reazioni di decomposizione del TiH₂. Le figure seguenti mostrano le analisi DSC effettuate sui campioni 8 e 11 con due cicli successivi di riscaldamento da 350 a 680°.

I picchi di flusso rappresentano trasformazioni, siano esse decomposizioni o trasformazioni di fase ed il valore maggiore di flusso indica una maggiore energia necessaria al fine di seguire l'incremento di temperatura imposto al campione di 20°/min.

In particolare, per entrambi i campioni nelle curve in blu abbiamo un piccolo picco con due cuspidi fra i 430 e 440 °C che rappresenta la decomposizione del TiH_2 . Questo è confermato dal fatto che questo picco è presente in entrambi i campioni solamente nel primo ciclo di riscaldamento (1a salita) mentre non ve ne è traccia nella seconda curva di riscaldamento dei campioni.

Molto più complessa l'interpretazione delle altre trasformazioni che avvengono in questo primo ciclo di salita che possono essere di fusione locale o di interdiffusione al bordo delle particelle nella prima salita.

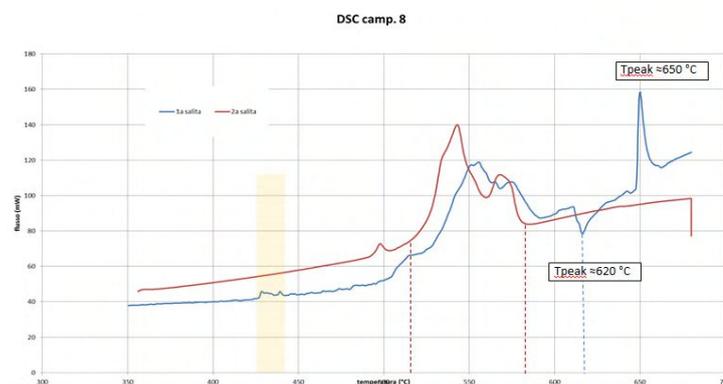


Figura 543. Analisi DSC sul campione 8 $AlMg_4Si_8Cu_4$

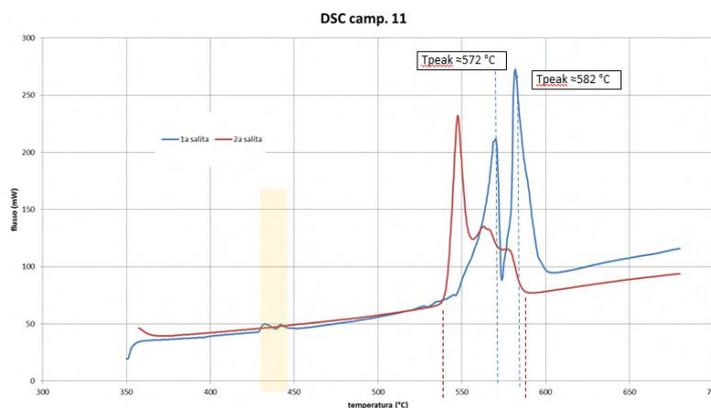


Figura 544. Analisi DSC sul campione 8 $AlMg_4Si_8Cu_4$

Ciò che è evidente dopo il primo riscaldamento, con superamento della temperature di fusione di tutte le particelle che costituiscono i campioni, è la formazione di leghe ternarie e quaternarie. Infatti, l'unico elemento che a 680° C non viene portato a fusione è teoricamente il rame ($T_F=1083$ °C), Tuttavia, il rame ha un eutettico con l'alluminio a circa 550°C ed una solubilità nell'alluminio a 550°C di oltre il 4%.

I picchi presenti sia per il campione quaternario 8 sia per il ternario 11 nel primo riscaldamento, la cui presenza è dovuta alla produzione di fenomeni localizzati di fusione e diffusione delle differenti particelle messe in evidenza dalle analisi SEM, non sono più presenti nella seconda analisi in quanto la permanenza a fusione a 680°C per 5 minuti, considerando la quantità ridotta del campione a pochi mg, permette di omogenizzare il tutto a leghe contenente i vari composti possibili ($AlMg_2$, $CuAl_2$, $CuMgAl_2$, Mg_2Al_3).

Ipotizzando che nel secondo ciclo di riscaldamento le reazioni endotermiche osservate corrispondano a fusioni l'intervallo di fusione per il campione 8 è compreso fra 520 e 580°C mentre per il campione 11 fra 540 e 590°C.

Tali risultati sono in linea con quanto atteso e promettono di garantire la produzione di campioni schiumabili eutettici.

Schiumatura dei precursori sviluppati ed analisi dei risultati

I precursori realizzati sono stati tutti schiumati in forno nelle condizioni determinate nel corso della scorsa annualità (rapporto RdS/2012/098). La disponibilità del sistema di carico e scarico automatico ha permesso di ottimizzarle con un preriscaldamento del forno a temperatura superiore (645°C) ed un controllo ottimale dei tempi di permanenza con un ciclo ottimizzato a temperatura di 630° C e 18 minuti di permanenza.

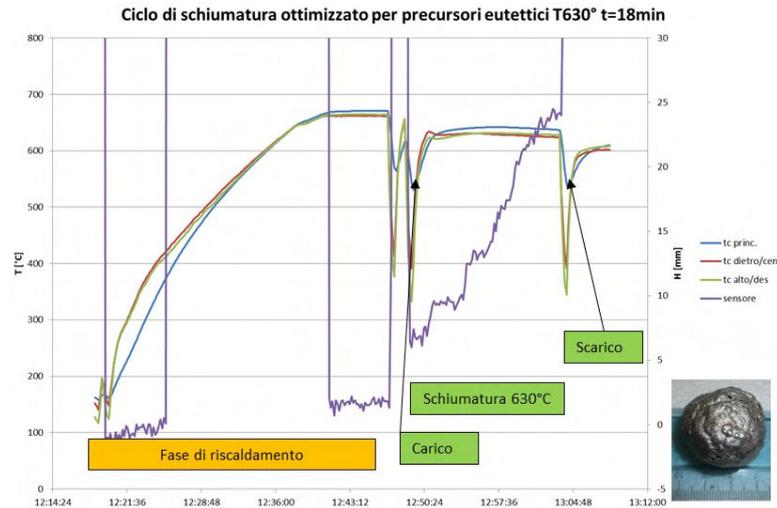


Figura 545. Ciclo automatico di schiumatura ottimizzato e foto di un campione tipo

L'ottimizzazione è stata ottenuta utilizzando la misura di espansione con il sensore laser e stabilendo il tempo nel momento in cui la crescita del campione dallo spessore originale di 5 mm fino a circa 23 mm si arrestava.

I risultati della schiumatura hanno evidenziato come, a differenza dei precursori commerciali che si presentano ben puliti e lucidi in superficie, per entrambi i tipi di precursori sviluppati ($AlMg_4Si_8$ e $AlMg_4Si_8Cu_4$) presentavano la formazione di agglomerati superficiali di colore scuro (Figura 546). Da una prima analisi EDS tali composti sono risultati ricchi di silicio, magnesio ed ossigeno.

Inizialmente tali formazioni erano state attribuite all'impiego di grafite come lubrificante esterno durante le fasi di compattazione, ma la composizione chimica rilevata dall'analisi EDS fra propendere per composti di ossidazione di silicio, magnesio ed alluminio affioranti grazie al trasporto da parte dell'idrogeno della reazione di dissociazione TiH_2 .

In conclusione sono stati realizzati dei precursori sandwich di schiuma di alluminio con pelli di spessore 1,5 mm +/- 0,2 mm di lega AA6060 con parametri di compattazione riportati in Tabella 123.

Tabella 123. Parametri per compattazione con pelli di alluminio

Temperatura	Pressione	Cicli [n]/durata[min]	$AlMg_4Si_8Cu$
300	300	6/2	PAFS1
350	300	6/2	PAFS3

Temperatura	Pressione	Cicli [n]/durata[min]	$AlMg_4Si_8$
300	300	6/2	PAFS2
350	300	6/2	PAFS4

La compattazione con dischi di alluminio e polveri ha mostrato come sia a 300 che a 350° C, pur riducendo il tempo del ciclo di pressatura, ha portato ad una buona adesione del metallo alle polveri compattate realizzando il precursore composito desiderato. I risultati della schiumatura sono mostrati nella Figura 547. L'analisi del ciclo di schiumatura mostra come a parità di condizioni il precursore contenente rame inizi l'espansione prima del precursore a base di Al-Si-Mg e come la compattazione sia ulteriormente migliorata dall'incremento della temperatura. Resta la necessità di investigare ulteriormente sui meccanismi che portano alla formazione del



Figura 546. Campione (ID 13) schiumato con composti scuri in superficie

composto scuro che appare anch'esso poroso che si è manifestato anche in questo caso pur avendo eliminato le possibili cause di inquinamento da grafite.



Figura 547. Campioni schiumati di precursori compositi con pelli di alluminio di spessore 1,5 +/-0,2 mm

Realizzazione di estrusi rinforzati

La realizzazione di estrusi rinforzati con schiuma di dimensione maggiore è stata resa possibile grazie al sistema di carico/scarico automatico acquisito nel corso del PAR 2011. In particolare, lo studio è stato effettuato per valutare le possibilità di realizzare estrusi a sezione rettangolare di lunghezza fino a 400 mm con precursori commerciali di tipo AISi10 già testati per la realizzazione di elementi compositi cilindrici.

La Figura 548 mostra il set up sperimentale che prevede il posizionamento dell'estruso al centro in un'apposita vaschetta in acciaio che evita eventuale fuoriuscita della schiuma.

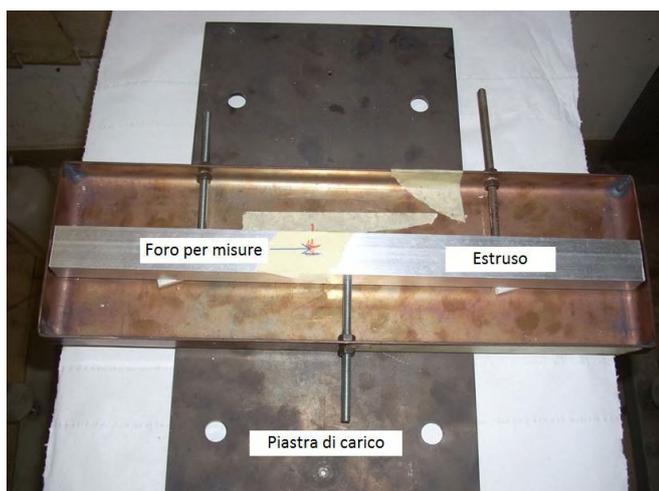


Figura 548. Set Up per produzione di estrusi rinforzati con schiuma

Sono stati eseguiti test sia con profilato posizionato parallelamente alla porta di ingresso forno, sia con profilati posizionati ortogonalmente alla porta di ingresso al centro del forno. La prima soluzione mostra i limiti dovuti a omogeneità di temperatura del forno in quanto le estremità più vicine agli elementi scaldanti tendono a raggiungere la fusione pur mantenendo la temperatura del forno impostata a 630°C

La seconda soluzione, con profilato posizionato più lontano dagli elementi scaldanti, ha dato invece risultati migliori, in questo caso pur portando la temperatura del forno ad una temperatura più prossima a quella di fusione del profilato, quest'ultimo mostra solamente una piccola zona di collasso nella parte prossima alla parete frontale del forno.

Le analisi visive e ai raggi X mostrano come questa soluzione permette la realizzazione di profilati rinforzati sufficientemente omogenei per una lunghezza di circa 300 mm. Rimane evidenziato il fatto che il forno è un elemento chiave per una schiumatura omogenea e che deve essere di dimensioni sensibilmente maggiori al componente da trattare in modo da garantire una zona di omogeneità della temperatura di dimensioni adeguate.



Figura 549. Profilato estruso di lunghezza 400 mm con evidenza della zona di collasso per eccessiva vicinanza alla parete posteriore del forno

In conclusione sono state sviluppate le metodologie di fabbricazione, dalla miscelazione alla schiumatura, di precursori eutettici che permettono un buon accoppiamento con leghe di alluminio della serie 6xxx. Il livello di densificazione raggiunta è stato sempre superiore al 92% con picchi oltre il 98% per i precursori a base di $AlMg_4Si_8$. Con la compattazione simultanea delle miscele di polveri con lamiere di alluminio è stata verificata la possibilità di ottenere direttamente per compattazione uniaassiale a caldo dei precursori compositi.

Le problematiche ancora aperte sono: il livello di densità ottenuta delle schiume, che è ancora inferiore a quella dei prodotti commerciali e la produzione di un prodotto di schiumatura non desiderato, molto probabilmente un silicato di magnesio e alluminio i cui meccanismi di formazione non risultano ancora ben chiari. Entrambe le problematiche potranno essere superate mediante il miglioramento delle miscele in termini di tipologia e quantità di agenti schiumanti.

Inoltre, sono estremamente interessanti i risultati ottenuti con il forno di schiumatura sviluppato nell'ambito di questa attività di ricerca che permette di dimostrare le possibilità di realizzare estrusi di alluminio rinforzati con schiume metalliche anche di dimensioni preindustriali, fino a 300 mm di lunghezza con un livello di porosità omogeneo. Lo sviluppo da parte di ENEA di precursori bassofondenti a base di Al, Si, Mg e Cu promette di incrementare le prestazioni delle schiume essendo queste leghe trattabili termicamente a differenza delle leghe binarie $AlSi$ commerciali finora utilizzate.

Sistemi di produzione di componenti compositi metallo schiume e di precursori per pannelli AFS

L'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università Roma Tor Vergata è mirata a due obiettivi:

1. Ottimizzazione del bonding metallurgico fra acciai al carbonio o inossidabili austenitici e precursori commerciali di aluminium foam;
2. Sviluppo di possibili processi di produzione (pressatura e/o laminazione) di precursori compositi piani specifici per i pannelli AFS.

Il primo obiettivo, a proseguimento delle attività condotte nella scorsa annualità, ha visto lo studio del bonding metallurgico sviluppato ad alta temperatura con la schiuma di alluminio in fase liquida inserita all'interno di tubicini in acciaio 1040 e acciaio inox AISI316L.

In questo caso gli esperimenti sono stati condotti inserendo pastiglie di precursore $AlSi_{10}$ all'interno di tubi di acciaio, che venivano poi chiusi ad una estremità. Il bonding in questo caso avviene solo ed esclusivamente nella fase di schiumatura ad elevata temperatura. Il sistema tubo-precursore viene inserito in un forno a muffola alla temperatura di 700°C. Questo permette di portare rapidamente il sistema a temperatura di schiumatura.

Nella presente annualità sono stati testati differenti condizioni di preparazione delle superfici interne dei tubicini utilizzando sia pulitura meccanica per attivare le superfici, sia la pulitura meccanica più il decapaggio con apposite soluzioni disossidanti.

I risultati ottenuti utilizzando la pulitura con abrasione meccanica e lavaggio con acetone e disossidante hanno permesso di realizzare bonding metallurgici con buona ripetibilità, giunzioni continue senza porosità o altri difetti. Queste giunzioni presentano una buona interdifferenza di Fe e Al; la zona di interdifferenza è larga circa 30-40 μm a testimonianza dell'eccellente qualità del bonding metallurgico.

Gli aspetti fondamentali del processo sono quindi:

- una buona finitura delle superfici di acciaio: deve essere rimosso lo strato di ossido originale e non ci debbono essere significative asperità, dove si potrebbero formare i pori;
- il disossidante deve essere distribuito in modo omogeneo all'interfaccia.

Il secondo obiettivo, inerente la realizzazione di compositi piani per AFS, ha previsto l'impiego di precursori commerciali $AlSi_{10}$ di sezione 20x5 mm e di pelli in acciaio inox AISI 316L (Figura 550).

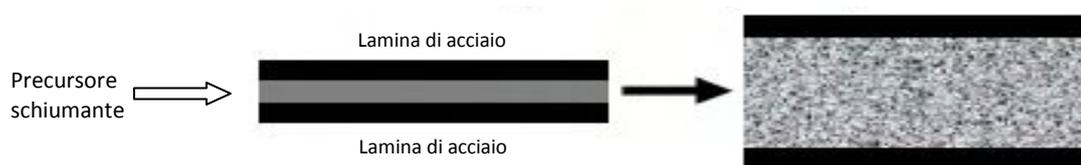


Figura 550. Realizzazione di AFS con pelli in AISI 316L e precursore $AlSi_{10}$

Anche in questo caso l'obiettivo è quello di realizzare un legame forte a caldo nella fase di schiumatura con la lega di alluminio in fase liquida. Tuttavia, è necessario che prima della schiumatura, al fine del suo utilizzo, sia stabilito un legame primario nel composito lamina-precursore. Il problema principale per la realizzazione di AFS è quindi quello di realizzare un composito pre-schiumatura con un opportuno legame pelle precursore.

Sono stati testati due processi. Il primo la co-laminazione diretta di pelli di acciaio con i precursori in modo da realizzare un'adesione essenzialmente meccanica, il secondo la pressatura a caldo/freddo con l'impiego di opportuni elementi promotori di adesione fisico/chimica.

Nel primo caso ci si è avvalsi dell'azienda Italchimici (Lumezzane), che ha reso disponibili per alcune prove dei laminatoi per testare la possibilità di co-laminare pelli di acciaio con strisce di precursori. Queste prove hanno dato esito negativo in quanto la grande differenza tra le caratteristiche meccaniche degli acciai e quelle del precursore in lega di Al induceva una deformazione plastica così diversa tra le tre parti che formavano il pacchetto da indurre chiari fenomeni di scollamento. Inoltre il precursore in barre realizzato per estrusione di polveri ha bassa duttilità per cui sottoposto a deformazione tendeva a rompersi senza creare alcun tipo di giunzione con le lamine di acciaio che tendevano a calandarsi con curvature divergenti.

L'attività si è quindi concentrata sulla realizzazione di compositi pelle-precursori per pressatura. Le prove di pressatura a caldo sono state condotte a varie temperature (inferiori a 400 °C, temperatura di dissociazione dell'agente schiumante TiH_2), con o senza disossidante, con o senza involucro metallico esterno di protezione. Per l'involucro si sono utilizzati fogli sottili di Cu e Ti, metalli molto reattivi con l'ossigeno che aiutano ad evitare l'ossidazione a caldo. Si intendeva creare un legame basato sulla diffusione allo stato solido aiutato dall'azione meccanica.

Entrambe queste tipologie di prova hanno dato in generale dei buoni risultati anche se a caldo il processo è più difficilmente controllabile a causa dei fenomeni di ossidazione, che non si può completamente eliminare. Nella preparazione del precursore composito con pressatura a caldo in alcuni casi si sono osservati dei difetti macroscopici e, più raramente, anche il distacco delle parti.

Per la maggior semplicità del metodo e soprattutto per i risultati migliori e meglio riproducibili si ritiene che, per la preparazione del precursore composito, la pressatura a freddo sia il processo più affidabile.

Anche se è un risultato scontato, si ribadisce che un aspetto critico è la finitura e la pulizia delle superfici che vengono poste a contatto fra pelli di acciaio e precursori. È stato effettuato uno studio mediante SEM del legame primario che si forma per trattamento delle superfici e pressione. In particolare le superfici devono essere attivate mediante grinding omogeneo con carte abrasive (grit 220) e decapaggio con opportune soluzioni disossidanti distribuite omogeneamente. La Figura 551 mostra la differenza di risultati sulla realizzazione del legame primario pelle-precursore in funzione della preparazione delle superfici.

Come anticipato il legame ottenuto per pressatura a freddo è un legame debole. Questo è evidenziato, anche nei campioni migliori dalle mappe microanalitiche di cui si riporta una sintesi di seguito.

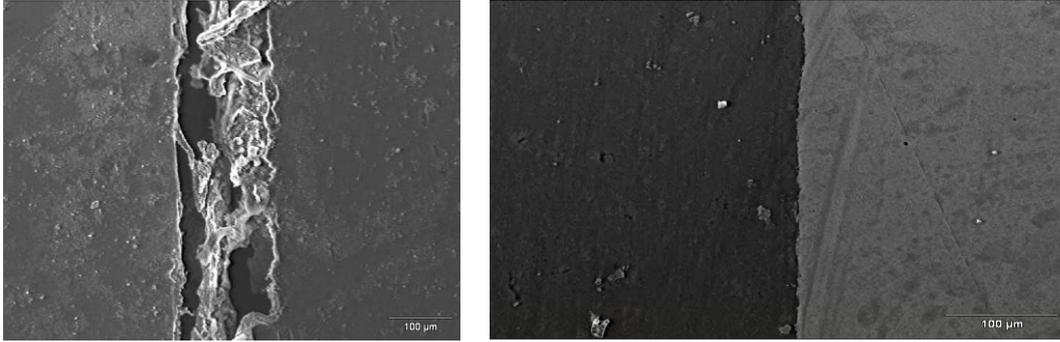


Figura 551. A sinistra un distacco fra pelle in acciaio inox 316 e precursore dovuto a una cattiva preparazione della superfici, a destra l'aspetto dell'adesione primaria ottimale realizzata con adeguata preparazione delle superfici

Come è possibile osservare, è netta la separazione fra lega di alluminio e acciaio [vedi mappe microanalitiche in rosso (Al) ed in verde (Fe) e profili delle Figure 552 e 553]. Questo indica che praticamente non vi è ancora nessuna interdifferenza fra gli elementi delle pelli e del precursore, quindi il legame instaurato non è altro che un adesione promossa dall'attivazione delle superfici e dalla presenza del disossidante. Tale adesione per quanto debole è indispensabile alla realizzazione del composito pre-schiumatura e di quello finale con alluminio in fase semi liquida. La perfetta adesione è infatti fondamentale ad evitare fenomeni di ossidazione che altrimenti si genererebbero nella fase di schiumatura ad alta temperatura che comprometterebbero quindi la formazione del legame metallurgico vero e proprio che si genera per diffusione ad alta temperatura.

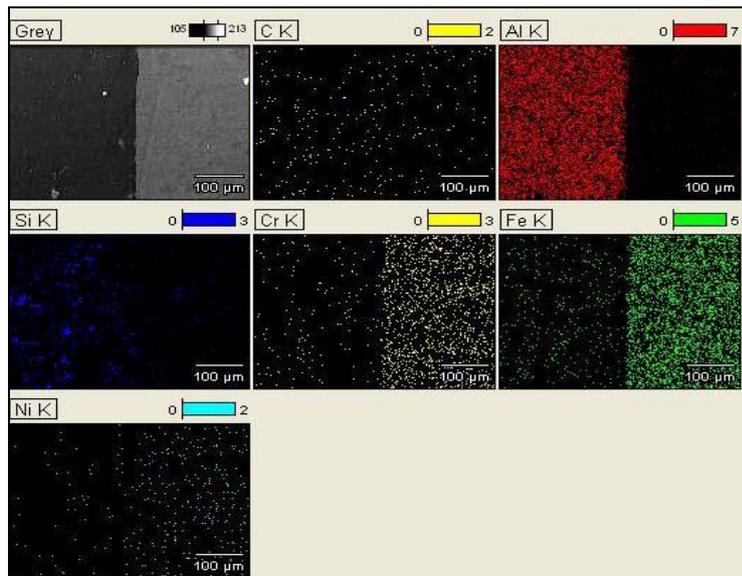


Figura 552. Mappa microanalitica EDS registrata sull'area della figura precedente per il bonding primario ottenuto a freddo

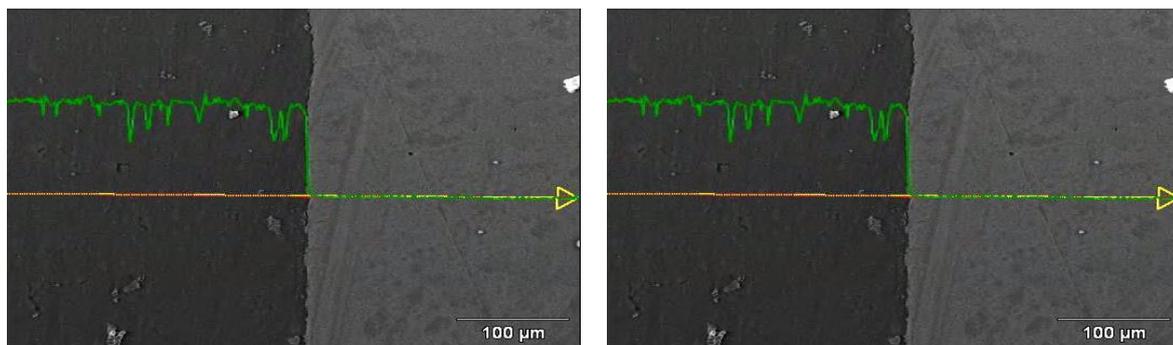


Figura 553. A sinistra il profilo Al ed a destra il profilo Fe

Il legame metallurgico si forma durante la schiumatura a temperature superiori ai 600° C con il precursore in fase semi liquida. La schiumatura sui campioni di studio, di dimensione 20 x 20 mm, è stata effettuata in analogia a quanto fatto per i tubicini in un forno a muffola alla temperatura di 700 °C e ricoprendo lateralmente il composito con un contenitore realizzato con fogli sottili di rame. Il rame è introdotto per fare da capture per l'ossigeno e prevenire/limitare fenomeni di ossidazione a caldo del precursore.

Le Figure 554 e 555 mostrano un'immagine SEM della zona di interfaccia pelle schiuma su un campione 20 x 20 mm e dei relativi profili di microanalisi EDS per gli elementi più rappresentativi (alluminio, ferro) per dimostrare l'evidenza della interdifferenza degli elementi dei lega che creano un legame metallurgico forte. L'ampiezza della zona di interdifferenza è di circa 20-25 µm.

Per maggiori dettagli sull'attività si rimanda al rapporto RdS/2013/099.

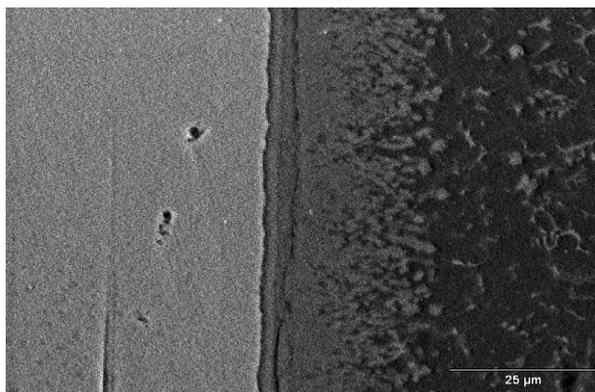


Figura 554. Interfaccia pelle d'acciaio-schiuma di lega Al-Si10 realizzata dopo una buona finitura delle superfici

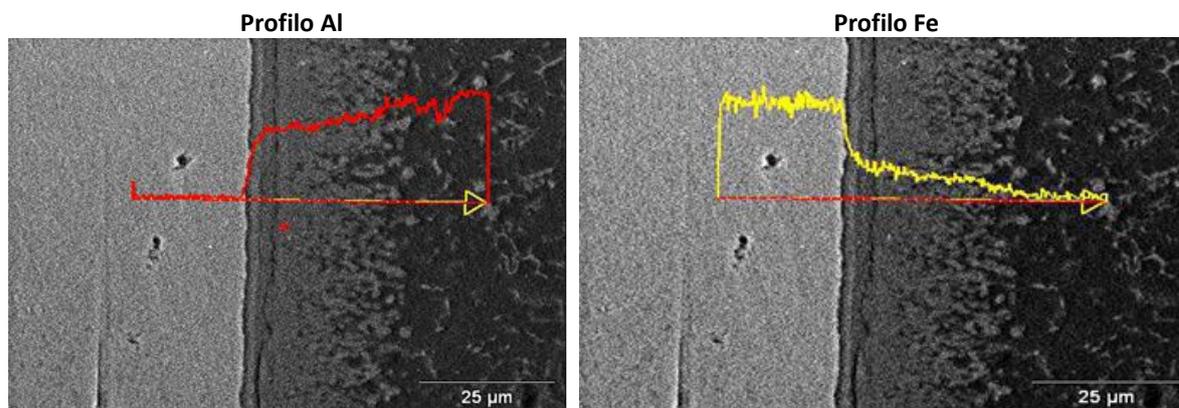


Figura 555. Profili di concentrazione dell'alluminio e del ferro presenti nell'acciaio AISI 316L e nella schiuma di lega Al-Si₁₀ registrati lungo la linea indicata che attraversa l'interfaccia

Dopo lo studio effettuato su campioni di dimensioni 20 mm x 20 mm, l'obiettivo è stato verificare la possibilità di applicare la tecnica a componenti di dimensione maggiore fissando come target la realizzazione una mattonella di precursore composito AISI 316 - AlSi₁₀ di dimensioni 100 mm x 100 mm. Questo comporta una criticità, i precursori commerciali esistono infatti essenzialmente sotto forma di barrette cilindriche di diametro 10 mm e di barrette rettangolari di dimensioni 20 mm X 5 mm per cui si introduce l'ulteriore difficoltà di verificare se il posizionamento parallelo di più precursori sia applicabile e con quali risultati.

In Figura 556 è mostrata la sequenza utilizzata per la realizzazione delle mattonelle di dimensione 100 x 100 mm con descrizione dei passaggi di preparazione del precursore composito e prodotto schiumato. La schiumatura è stata effettuata nel forno, sviluppato da ENEA, in differenti condizioni di temperatura e tempo di processo monitorate mediante il sistema di controllo di espansione laser.

Le analisi effettuate mostrano come, in assenza di involucri esterni per il mantenimento della schiuma, la schiuma in fase liquida tende a distaccarsi sulla periferia delle mattonelle.

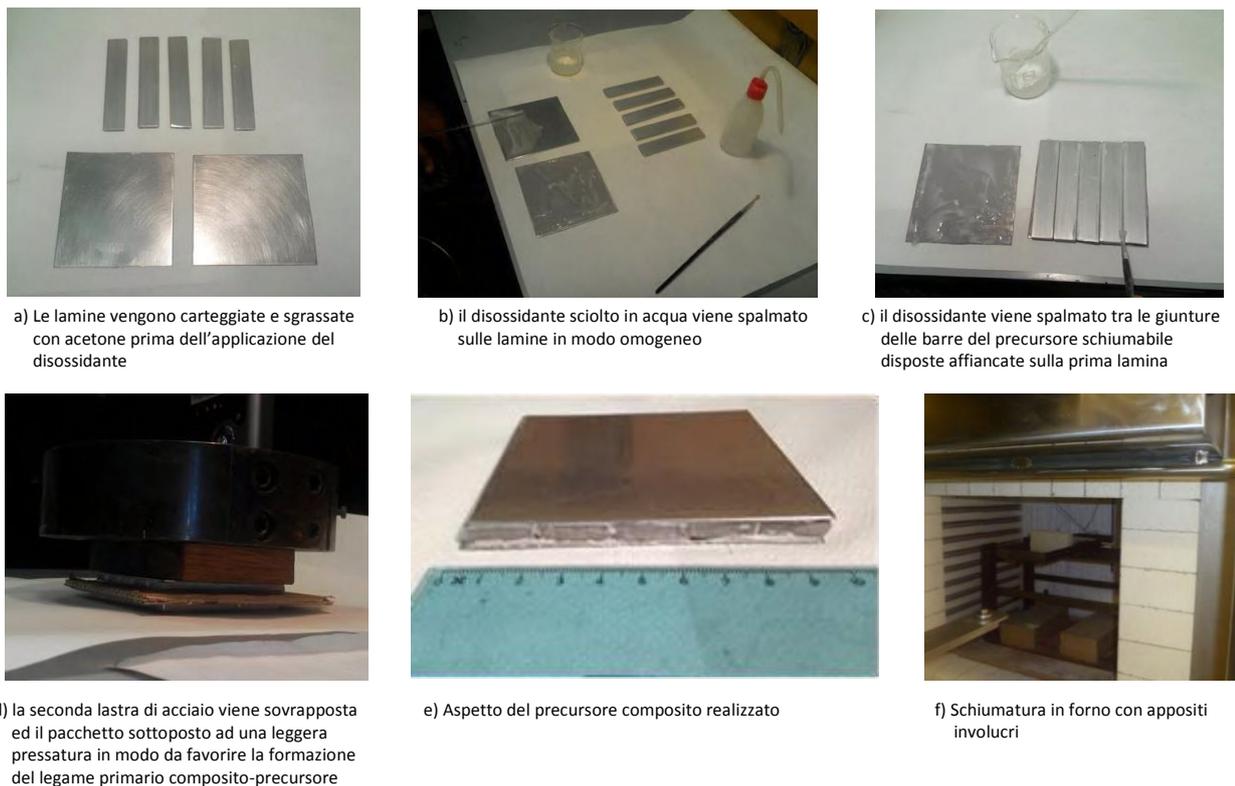


Figura 556. Sintesi della procedura di fabbricazione sviluppata dall'Università di Roma Tor Vergata per pannelli AFS

Tuttavia, in prima analisi anche in questo caso il legame metallurgico fra schiuma e lamina di acciaio si realizza in modo corretto e, pur potendo distinguere delle zone d'interfaccia fra i precursori contigui utilizzati, la distribuzione dei pori è sufficientemente omogenea.

Alcuni limiti riguardano la minore espansione raggiunta rispetto al precursore libero di espandere a causa del peso della lamina di acciaio. Per superare questo limite si pensa di sviluppare in futuro una tecnica assistita da gravità in cui la schiuma possa svilupparsi verso il basso invece che verso l'alto (figura 557). Questo metodo permetterebbe anche di realizzare pannelli di spessore controllato ponendo, entro i limiti del processo, alla distanza voluta un piano di contrasto.

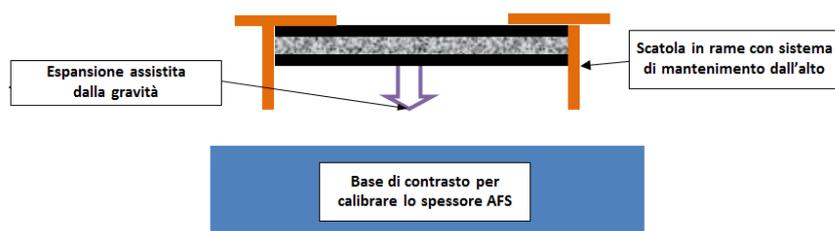


Figura 557. Possibile schema per migliorare le caratteristiche e le tolleranze dei pannelli AFS

Tecniche di saldatura ad elevata efficienza per il settore ferroviario

Nel settore ferroviario, l'applicazione delle leghe di alluminio risale agli anni '70 e, nella successiva decade, lo sviluppo delle tecniche di estrusione di forme complesse di elevata dimensione a spessore sottile ha portato alla realizzazione di numerosi treni in varie leghe di alluminio (AA6005 T6, AA6082 T6). Infatti, la ricerca di maggiore velocità e maggiore efficienza nel trasporto ferroviario negli ultimi anni ha portato i maggiori costruttori di treni all'impiego di leghe di alluminio che ormai costituiscono quasi interamente sotto forma di grandi estrusi la carrozzeria dei vagoni ferroviari.

A livello mondiale l'impiego di estrusi modulari in lega di alluminio per la realizzazione di treni ad alta velocità è ormai una prassi consolidata, vedi i progetti del TGV e TGV Duplex francesi, ICE tedesco, i treni della TALGO spagnola, che coinvolgono le principali aziende del settore: Alstom, Ansaldo Breda, Siemens e TALGO. La

Figura 558 mostra uno studio per la realizzazione della carrozza ferroviaria interamente con estrusi di lega di alluminio che nella maggior parte dei casi vengono ancora oggi saldati con processi MIG automatizzati e manuali.

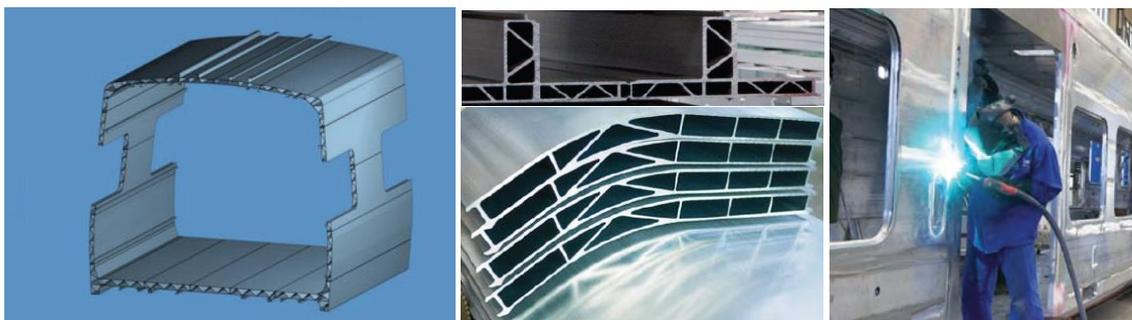


Figura 558. Realizzazione di carrozze ferroviarie con assemblaggio per saldatura di grandi profilati estrusi

Restando all'Italia, senza tornare troppo indietro negli anni, a partire dal vecchio pendolino ETR460 si è passati dall'ETR 500 fino ad arrivare al superveloce AnsaldoBreda ETR1000 la cui velocità di omologazione raggiunge i 360 km/h.

Il lavoro svolto in questa subtask è suddiviso in tre parti. Una prima parte introduttiva che illustra brevemente le tecnologie di saldatura nel settore ferroviario, con particolare riguardo alla saldatura delle leghe di alluminio e quindi della parti delle carrozze ferroviarie strutturali e non strutturali ad eccezione dei componenti primari quali i carrelli e di quei componenti la cui classe di performance (CP) sia superiore alla CP B secondo la ISO 15085-3. Una seconda parte, che presenta le tecniche ad elevata efficienza di derivazione aeronautica/aerospaziale ancora poco utilizzate per il settore ferroviario che ha portato all'acquisizione dei componenti per un impianto prototipale di saldatura plasma presso il C.R. ENEA Casaccia. La terza parte che riguarda le ultime innovazioni nel settore della saldatura laser, a prosecuzione delle attività svolte nel corso dei precedenti PAR, grazie alla collaborazione dell'azienda Tube Tech Machinery che, in qualità di socio del Consorzio CALEF partecipato da ENEA, ha messo a disposizione a titolo completamente gratuito un impianto di saldatura dotato di una nuova sorgente laser in fibra ad elevata brillantezza, che ha permesso da un lato di validare ulteriormente i risultati sulla saldatura laser ottenuti con sorgente Nd-YAG ENEA di vecchia generazione, sia di pannelli AFS sia di leghe di alluminio della serie 6xxx, dall'altra di aprire una nuova finestra sulla qualità della saldatura laser delle leghe di alluminio grazie all'impiego della testa Wobling a rotazione circolare dello spot focale interamente sviluppata in Italia dalla IPG Photonics.

Principali tecnologie impiegate nel settore ferroviario per la saldatura delle leghe leggere

Le tecnologie di saldatura delle leghe di alluminio tradizionali sono la TIG (Tungsten Inert Gas) e la MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas). La prima (TIG) si presta alla saldatura di particolari interni di basso spessore (1-3 mm) per i quali è richiesta una buona qualità e un'ottima finitura estetica. La seconda tecnica è quella a filo continuo semi automatica, utilizzata nella saldatura delle leghe di alluminio con gas inerte, in genere argon (MIG), che permette una maggiore produttività ma presenta una qualità mediamente inferiore rispetto alla tecnologia TIG. La saldatura MIG di spessori inferiori a 3 mm è rara e comunque la saldatura di testa è spesso assistita dall'impiego di supporti ceramici data la fluidità in fase liquida delle leghe di alluminio che tendono a colare.

Nella saldatura per fusione, i principali difetti della saldatura delle leghe di alluminio sono la porosità dispersa di idrogeno, le incollature, la cricatura a caldo e il "softening" in particolare nella zona termicamente alterata.

La progettazione delle strutture saldate di alluminio necessita di particolari accorgimenti, ovvero considerando per le zone di saldatura, ad esempio estrusi, spessori maggiorati e/o nella fase di progettazione il posizionamento dei giunti saldati, quando possibile, in zone a minore sollecitazione. Il softening della zona termicamente alterata è infatti il fenomeno cui sono sottoposte tutte le leghe di alluminio la cui resistenza viene incrementata attraverso opportuni trattamenti termici di invecchiamento (T: leghe delle famiglie 2xxx, 4xxx con Mg, 6xxx e 7xxx) o incrudimento (H: leghe delle famiglie 1xxx, 3xxx, 5xxx). Il superamento locale della temperatura di ricristallizzazione, che è per queste leghe intorno a 220-280° C, fa sì che lo stato di questa zona ritorni in quello di ricottura perdendo parte delle caratteristiche meccaniche. Mentre per le leghe da trattamento termico (T) si ha la tendenza a recuperare parzialmente, con un processo di invecchiamento naturale parte delle caratteristiche raggiungendo uno stato T4, per le leghe da Incrudimento (H) non ci si può attendere nessun miglioramento. Questo è il motivo per cui l'Eurocodice 9 UNI ENV 1999 stabilisce in funzione della tecnica di saldatura è del tipo di lega dei fattori di addolcimento che vanno da 0,5 ad un massimo dello 0,86 riconoscendo in fase di progettazione l'indebolimento locale del materiale che per normativa con la tecnica di saldatura MIG è compreso fra 20 e 40 mm in funzione dello spessore saldato.

Tecnologie innovative di saldatura delle leghe di alluminio

Le tecnologie di saldatura automatiche ben si associano allo sviluppo di prodotti estrusi di grande dimensione e dei pannelli AFS. Come verificato nelle attività dei precedenti PAR, la saldatura laser ed in particolare la saldatura laser ibrida con laser a stato solido sono ottime candidate nella realizzazione di impianti automatizzati per la saldatura di sub componenti, in particolare piani, realizzati dalla saldatura di grandi estrusi di alluminio, la cui larghezza raramente supera i 500 mm. La diretta concorrente della saldatura laser, in termini di qualità della giunzione e non di produttività e flessibilità dell'utensile, è la saldatura a stato solido Friction Stir Welding (FSW).

Brevemente nella Friction Stir Welding il cordone di saldatura è formato da un utensile cilindrico che è distinto in due sezioni: la spalla (shoulder) più larga e la punta leggermente più corta dello spessore da saldare. L'utensile ruotando genera attrito, quindi calore, rendendo plastico il materiale. La punta penetra fra i due lembi plasticizzati e induce un'azione di "rimescolamento" del materiale fra i due lembi e generando così la saldatura. Una volta che l'utensile è all'interno, la traslazione lungo la linea di contatto chiude dietro di sé la separazione con metallo compatto ed uniforme (figura 559). Aspetto interessante della FSW sta nel fatto che nel materiale da saldare non viene raggiunta la temperatura di fusione, riducendo così i difetti dovuti alla criccabilità a caldo.

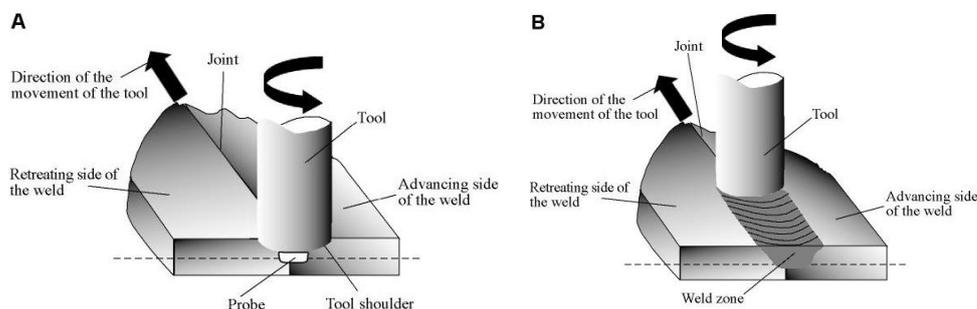


Figura 559 . Schematizzazione del processo di saldatura per FSW

I principali vantaggi della saldatura FSW sono:

- bassa distorsione;
- eccellenti proprietà meccaniche;
- assenza di porosità, assenza di sputtering e buona finitura superficiale;
- assenza di fumi di saldatura.

Le principali limitazioni:

- velocità di saldatura più bassa rispetto ad alcuni processi di saldatura per fusione, in particolare rispetto al laser welding;
- i pezzi da saldare, considerato il tipo di processo, devono essere bloccati in modo solido;
- il supporto a rovescio è obbligatorio e le geometrie di giunzione sono pressoché limitate alla sola saldatura di testa.

Complessivamente considerato che la punta deve sempre variare in funzione dello spessore il processo FSW è estremamente poco flessibile.

Inoltre, la Tabella 124 mostra come la saldatura FSW, precedentemente ritenuta fra le più efficienti energeticamente, non sia particolarmente efficiente in quanto, se pur vero che non porta a fusione il materiale e le potenze in gioco sono spesso inferiori alle tecnologie di saldatura tradizionali, la lentezza del processo fa sì che il calore complessivo per unità di lunghezza della saldatura, a parità di condizioni, sia sensibilmente maggiore anche alle tecnologie di saldatura tradizionale e di conseguenza alla tecnologia di saldatura laser.

Tabella 124. Comparazione dell'apporto termico complessivo necessario per la saldatura a diverse velocità delle leghe di alluminio

Legga	FSW		Gas tungsten arc welding		Gas metal arc welding	
	P (W)	HI (kJ/cm)	P (W)	HI (kJ/cm)	P (W)	HI (kJ/cm)
6061Al (11 ipm)	3265	3,59	3850	6,05	5200	6,10
5083 Al (4.5 ipm)	2030	9,57	3850	6,05	5200	6,10
7075 Al (3.1 ipm)	2105	14,36	3850	6,05	5200	6,10
6082 Al (11 ipm)	3382	6,53	3850	6,05	5200	6,10

In fine, la saldatura FSW, prevede dei costi di impianto notevoli, legati anche alle royalty che è necessario versare alla società TWI proprietaria della tecnologia, produttività minore rispetto alla saldatura laser possibilità di saldatura quasi esclusivamente testa a testa.

La saldatura laser, qui non descritta in quanto ampiamente trattata nei precedenti PAR, è certamente più produttiva ma ha comunque dei costi di impianto notevoli ed è suscettibile a porosità, cricatura a caldo ed inclusioni di allumina. Tali problematiche possono essere superate mediante l'impiego di opportuni materiali d'apporto e tecnologie ibride laser arco, che comunque moltiplicano la complessità dell'impianto che trova economicità principalmente in elevati volumi di produzione dello stesso componente (automotive) e meno si presta all'applicazione nel settore delle costruzioni ferroviari dove i particolari identici sono di grosse dimensioni e di piccoli numeri.

Una delle tecnologie invece ancora poco applicata, in particolare nel tessuto nazionale è la tecnologia di saldatura plasma (PAW) delle leghe di alluminio che promette con costi di investimento più limitati livelli qualitativi comparabili con la saldatura laser. Inoltre, questa tecnologia è parente della più tradizionale tecnologia TIG con problematiche di sicurezza ben note agli addetti ai lavori, per cui più metabolizzabile dal tessuto produttivo delle piccole medie imprese del panorama italiano.

La saldatura plasma key-hole raggiunge densità di energia di 10^6 W/cm² comparabili con quelle dei sistemi di saldatura laser, la Figura 560 mostra schematicamente la formazione del gas plasma che viene generato per mezzo di un arco pilota fra elettrodo ed ugello. Il gas ionizzato così generato viene espulso ad alta velocità verso il pezzo attraverso un ugello raffreddato. L'energia in questo modo resta molto meglio confinata e si hanno variazioni limitate al variare della distanza fra elettrodo e pezzo.

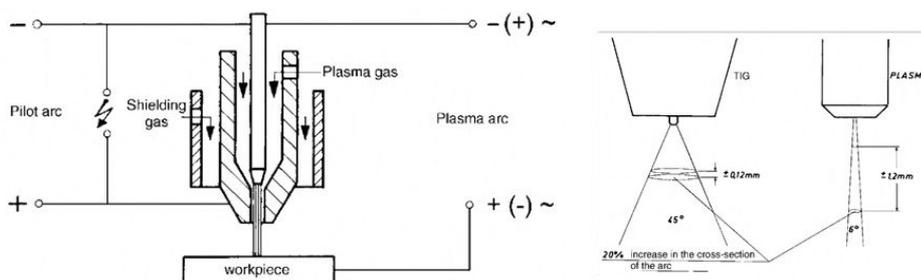


Figura 560. Schematizzazione della saldatura plasma e differenza di distribuzione di energia fra la saldatura TIG e la saldatura plasma

Rispetto alla saldatura TIG fissata una velocità di saldatura di 0,4 m/min gli spessori saldabili in single pass passano da circa 2 mm a 4 mm (Figura 561)

In ENEA è stato progettato ed acquisito un sistema di saldatura plasma costituito da:

- un generatore a caratteristica cadente, in particolare il generatore prescelto è capace di erogare una corrente stabile di 450 A in continuo;
- un sistema di controllo a microprocessore in grado di controllare la forma d'onda dell'arco e di gestire rampe di salita ed evanescenza dell'arco. Questo particolare sistema di controllo permette di gestire in modo completamente libero la forma d'onda della corrente di saldatura, aspetto molto importante nello sviluppo di processi di saldatura sull'alluminio, in quanto il processo deve essere in grado di effettuare l'operazione di "sabbatura ionica" per distruggere lo strato di allumina Al₂O₃ ovvero avere gli ioni indirizzati verso il pezzo e non gli elettroni come accade nella tradizionale saldatura TIG;
- un sistema di gestione del filo d'apporto e dei gas di assistenza che per questo tipo di tecnica si suddividono in gas plasma, che in generale è argon dato il suo basso potenziale di ionizzazione, il gas di copertura al dritto e se necessario il gas di copertura a rovescio.

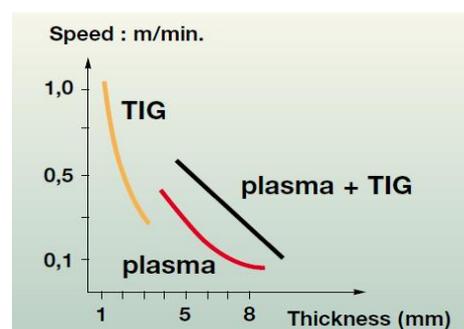


Figura 561. Potenzialità della saldatura plasma in termini di spessori e velocità di leghe di alluminio

A differenza della saldatura TIG dove l'arco è libero e la sua temperatura decresce da circa 10000 a circa 4000 K sul pezzo, la saldatura a plasma confinato permette di raggiungere temperature che vanno da oltre 24000 a circa 16000 K sul pezzo. La Figura 562 sintetizza i due processi.

L'impiego della tecnologia plasma rispetto alla TIG, anche su spessori relativamente sottili come quelli delle pelli degli AFS, è giustificato dal fatto che la bassa densità di energia del processo TIG associata all'elevata conduzione del calore delle leghe di alluminio, e in particolare del sistema AFS, ha mostrato in alcuni test di saldatura TIG-automatica un elevato transitorio nella stabilizzazione del processo che è difficilmente controllabile (Figura 563).

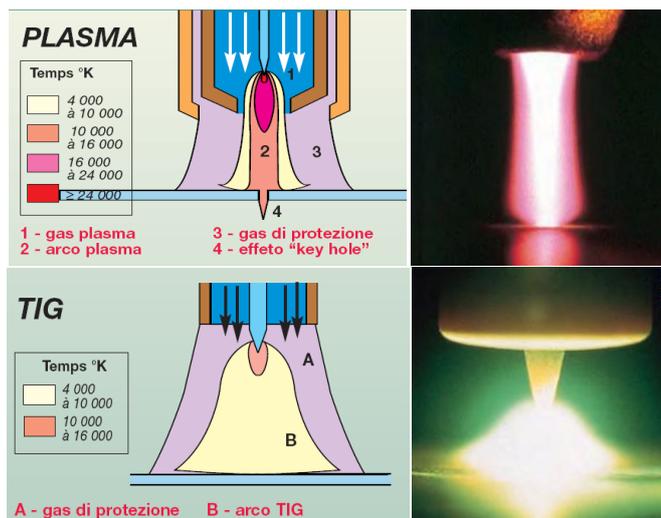


Figura 562. Differenza fra distribuzione di temperatura del sistema plasma key-hole e TIG



Figura 563. Effetti transitori dovuti alla bassa densità di energia del processo di saldatura TIG su AFS

Saldatura con nuove sorgenti laser

La disponibilità da parte della Tube Tech Machinery (TTM) s.r.l di Cazzago San Martino (BS) di una stazione di saldatura laser sperimentale con una sorgente laser in fibra da 5 kW, un robot antropomorfo con sistema di adduzione per filo d'apporto ha permesso di testare i parametri di saldatura determinati sulla sorgente Nd-Yag di 2 kW di ENEA che rappresentava lo stato dell'arte agli inizi del 2000 con quella che oggi, a livello di qualità del fascio ed efficienza, rappresenta lo stato dell'arte dei sistemi di saldatura laser industriali. Particolare attenzione va posta proprio sull'efficienza energetica delle nuove sorgenti laser a stato solido che sono passate dal 2-3% circa dei laser Nd-Yag pompati a lampade a circa il 30% delle nuove sorgenti in fibra.

Sono state effettuate una serie di prove di rifusione su un pannello si AFS con pelli di spessore 1,7 mm. Le prove hanno permesso di verificare che la migliore focalizzazione, garantita da questo nuovo laser che permette di utilizzare fibre per il trasporto del fascio da 200 µm contro i 600 µm del laser Nd-YAG con bassa qualità del fascio laser.

Le migliori proprietà del fascio di questi nuovi laser permettono di avere uno spot focale di 400 µm con lente di focalizzazione di 300 mm contro i 450 µm con focale da 150 mm utilizzati nel corso delle sperimentazioni del vecchio PAR. Questo fattore induce due vantaggi diretti:

1. maggiore profondità di campo, minore sensibilità alla focalizzazione del fascio che garantisce condizioni operative più ampie: sono stati testati intervalli da -3 a + 3 mm di defocalizzazione senza apprezzabili variazioni sul processo;
2. la possibilità di utilizzare focali molto più lunghe elimina del tutto i problemi legati agli sputtering ed al danneggiamento dei vetrini di protezione.

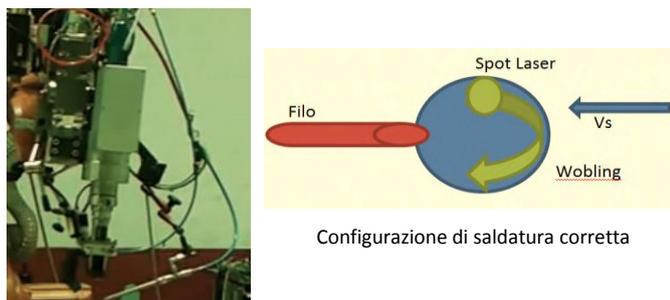
A partire dai parametri di saldatura con laser Nd-Yag che prevedevano l'utilizzo di 2000 W e 2 m/min sono state effettuate una serie di prove con questo nuovo sistema di saldatura laser. Le prove hanno evidenziato come con questo nuovo sistema di saldatura la finestra dei parametri di saldatura si ampli garantendo una maggiore robustezza del processo, qualità questa molto ricercata nel mondo industriale. I parametri per la saldatura di testa delle pelli dei pannelli AFS sono riportati in Tabella 125.

Tabella 125. Parametri di saldatura AFS con laser e filo d'apporto

Potenza	Velocità	Focalizzazione	Filo d'apporto
2000 W	2, 5 m/min	+3/-3	2, 5- 3m/min

Con i parametri determinati sono stati saldati più campioni rappresentativi di possibili configurazioni di giunzioni per la realizzazione di componenti l'alleggerimento nel settore ferroviario.

Sulla stessa stazione di lavorazione, è stato possibile testare anche un'innovativa testa di focalizzazione che permette di orbitare circolarmente lo spot focale del fascio laser all'interno del bagno fuso permettendo di migliorare la stabilità del key-hole. L'instabilità del key hole nella saldatura laser delle leghe di alluminio è infatti un problema ben noto che ha limitato in questi anni l'applicazione di tale tecnica. Infatti, questo fenomeno induce delle porosità nei giunti saldati è possibile ridurre solo con l'applicazione di tecnologie ibride che implicano una maggior complessità del processo ed uno stretto controllo dei parametri.

**Figura 564. Saldatura con testa di focalizzazione con wobbling circolare della IPG Photonics Italia**

La testa di saldatura prototipale utilizzata, di proprietà della IPG Photonics e sviluppata e brevettata in Italia (Figura 564), è mostrata nella figura seguente. E' stata installata sulla stazione di lavorazione TTM ed è stata utilizzata sia per la saldatura diretta fra AFS sia per la saldatura di AFS con profilati estrusi di lega 6060.

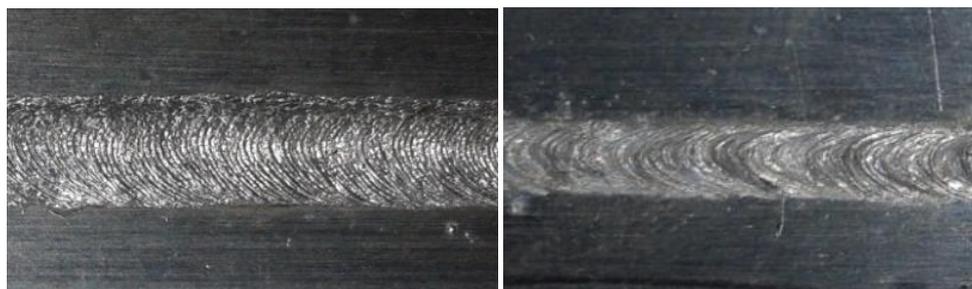
La saldatura con wobbling viene effettuata con un collimatore da 200 mm ed una focale da 300 mm, portando in questo caso lo spot focale a 300 μm . Tuttavia questo viene ruotato velocemente, con frequenze nell'ordine dei 100 Hz, per cui pur essendo maggiormente focalizzato rispetto alla configurazione precedente la rotazione ne riduce l'effetto penetrante.

Nelle condizioni di saldatura è stato verificato come sia necessario ridurre la velocità ed abbassare la velocità di saldatura per permettere la piena penetrazione (Tabella 126).

Tabella 126. Parametri di saldatura AFS con laser Wobling e filo d'apporto

Potenza	Velocità	Focalizzazione	Filo d'apporto
2500 W	1,5 m/min	+3/-3	1,5m/min

Il rapporto fra potenza e velocità si dimezza passando da 1,25 a 0,6 tuttavia cresce molto la qualità della saldatura che si presenta con un profilo molto ben raccordato e con un aspetto superficiale eccellente. La migliore qualità è stata confermata anche da test radiografici su saldature di lamiere di alluminio di spessore maggiore che hanno mostrato come le porosità siano completamente assenti con l'impiego del wobbling.

**Figura 565. A Sinistra l'aspetto superficiale della saldatura di AFS con Laser-Wobling, a destra la saldatura con solo Laser**

In fine, sono stati saldati dei simulacri di componenti che è possibile assemblare con AFS e profilati di alluminio. In Figura 566 sono riportati i simulacri che, parzialmente realizzati con saldatura laser e laser-wobbling saranno finiti dai assemblare con saldatura plasma.



Figura 566. Simulacri di componenti alleggeriti ottenuti per assemblaggio di AFS e Profilati estrusi

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università de L'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila, hanno riguardato lo studio teorico-sperimentale delle prestazioni di convertitori DC/DC di potenza per la carica di batterie di veicoli elettrici.

Il lavoro svolto, nel quadro dell'obiettivo a, si è articolato nelle seguenti fasi:

- sviluppo e la realizzazione di un sistema automatico di collaudo e di test per convertitori di potenza DC/DC;
- verifica delle prestazioni del convertitore di potenza DC/DC in condizioni reali di funzionamento tramite una campagna di misure da effettuare nella sede indicata dall'ENEA, utilizzando il sistema di misura sviluppato.

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova, nell'ambito dell'obiettivo a, ha effettuato uno studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless. Il lavoro prevedeva nello specifico: la progettazione di un sistema di trasferimento dell'energia elettrica senza contatto (STEESC) per una microvettura e lo studio del funzionamento dello stesso in diverse condizioni di esercizio (veicolo fermo o in movimento, ricariche a piena potenza o parziali etc.)

Università di Roma "Sapienza", Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università di Roma "Sapienza" riguardavano la stima del fabbisogno energetico conseguente all'introduzione di flotte di veicoli elettrici per il trasporto pubblico e la distribuzione delle merci in campo urbano. Sono stati analizzati due casi di studio, relativi rispettivamente alla rete di trasporto pubblico ed alla distribuzione urbana delle merci.

Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Nell'ambito dell'obiettivo c ci si è avvalsi del contributo del Dipartimento di Ingegneria Industriale, gruppo Metallurgia, dell'Università Roma Tor Vergata la cui attività è stata mirata all'ottimizzazione del bonding metallurgico fra acciai al carbonio o inossidabili austenitici e precursori commerciali di aluminium foam ed allo sviluppo di possibili processi di produzione (pressatura e/o laminazione) di precursori compositi piani specifici per i pannelli AFS.

Altre collaborazioni

Durante l'annualità in corso, si sono svolti una serie di incontri tra **ENEL** ed ENEA tesi a valutare l'utilizzo di inverter in reverse mode nei sistemi di ricarica potenziati in AC (obiettivo a).

ENEL infatti ha sviluppato la stazione di ricarica "Fast recharge" che consente di ricaricare veicoli con potenze fino a 43 kW in corrente alternata, in collaborazione con Renault che con la ZOE dispone dell'unica autovettura dotata di un caricabatterie di potenza adeguata alla stazione. ENEL ha quindi messo a disposizione, a titolo gratuito, una di queste colonnine.

La colonnina ha il vantaggio di essere molto compatta e con costi ridotti rispetto alle stazioni di ricarica CHAdeMO, grazie al fatto che la conversione della corrente da alternata a continua avviene a bordo del veicolo e non all'interno della stazione. Consente anche la ricarica lenta ed è così compatibile con tutti i veicoli elettrici.

E' stata quindi considerata la possibilità di sperimentare la colonnina "Fast recharge" ENEL insieme con il "caricabatterie integrale" ENEA per veicoli diversi dalla ZOE, come ad esempio la Nissan Leaf, acquistata dall'ENEA nell'ambito di un diverso progetto. La Nissan Leaf ha un suo sistema di ricarica lenta, compatibile con la stazione Fast Charge di ENEL, ma non è in grado di accettare una ricarica rapida in corrente alternata, perché il caricabatterie di potenza massima fornito con la vettura è da 9 kW. Per la ricarica rapida utilizza un diverso connettore che consente, bypassando il caricabatterie di bordo, di alimentare direttamente in corrente continua la batteria (fino a 50 kW). Il sistema di comunicazione veicolo-stazione di ricarica, che diventa indispensabile per la gestione delle fasi di ricarica, è compatibile con il protocollo di comunicazione "CHAdeMO". In questo contesto, il "caricabatterie integrale" ENEA (SubTask a1), può offrire anche un servizio di ricarica rapida in corrente continua per veicoli compatibili con il protocollo e connettore CHAdeMO, se completato con una interfaccia CAN-BUS per comunicare con tale protocollo. Il protocollo CAN di comunicazione fra veicolo e stazione di ricarica è stato quindi riportato nello standard "CHAdeMO TS D 0007: 2012" in cui vengono scambiate tutte le informazioni relative ai parametri elettrici fra veicolo e stazione.

Nell'ambito dell'obiettivo c, a titolo completamente gratuito, ci si è avvalsi della collaborazione della **Tube Tech Machinery srl** di Cazzago San Martino (BS), azienda leader nella fornitura di impianti di saldatura e taglio laser, che ha messo a disposizione un impianto di saldatura laser per la saldatura di componenti in schiuma di alluminio e della **IPG Italia** che ha messo a disposizione di un prototipo di testa di focalizzazione laser Wobling.

Progetto 1.2.2

Sistemi avanzati di accumulo di energia

- C. Arbizzani, N. Guerrini, M. Guidotti, M. Mastragostino, "Materiali catodici per batterie litio ione ad elevata energia", Università di Bologna, Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", RdS/2013/236
- A. Birrozzi, F. Maroni, G. Carbonari, R. Tossici, F. Nobili, R. Marassi, "Ricerca di materiali anodici per batterie litio ione di più elevata energia", Università degli Studi di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie, RdS/2013/237
- P. Gislon, C. Cento, A. Masci, F. Alessandrini e P.P. Prosinì, "Anodi di silicio nanostrutturati per batterie litio-ione", ENEA, RdS/2013/238
- F. Rondino, V. Orsetti, A. Rufoloni, A. Santoni, "Preparazione e caratterizzazione morfologica di anodi di silicio nanostrutturati per batterie litio-ione", ENEA, RdS/2013/239
- P.P. Prosinì, C. Cento, M. Carewska e A. Masci, "Preparazione di materiali anodici e catodici in scala utile per la verifica degli effetti dello scale up di produzione sulle prestazioni dei materiali", ENEA, RdS/2013/240
- M. Montanino e P. P. Prosinì, "Redox Shuttle" per la protezione delle batterie al litio da sovraccarico", ENEA, RdS/2013/241
- P.P. Prosinì, A. Pozio, C. Cento, M. Carewska e A. Masci, "Realizzazione e caratterizzazione di celle litio-ione complete per la verifica delle prestazioni in condizioni operative", ENEA, RdS/2013/242
- R. Lazzari, E. Micolano, M. Conte, F. Vellucci, "Procedura di prova RSE-ENEA per batterie litio-ioni - Gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", RdS/2013/243
- R. Lazzari, E. Micolano, M. Conte, F. Vellucci, "Procedura di prova RSE-ENEA per supercondensatori - Gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", RdS/2013/244
- G. Appetecchi, F. Alessandrini, B. Scrosati, "Procedure di prova per la caratterizzazione elettrochimica di celle complete litio-ione e dei suoi componenti - Gruppo di coordinamento CNR-ENEA-RSE", RdS/2013/245
- F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti, "Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie", Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, RdS/2013/246
- F. Vellucci, V. Sglavo, G. Pede, "Moduli standard di batterie al litio: test di caratterizzazione e duty cycle per applicazioni stazionarie con ottimizzazione del BMS", ENEA, RdS/2013/247
- M. Fiorino, M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo, "Sviluppo, messa a punto e sperimentazione di un sistema combinato batterie al litio-ferro-fosfato/FER per applicazioni in bassa tensione. Rapporto 1 - Sviluppo sperimentale e perfezionamento degli apparati di controllo e comunicazione", Università di Palermo DEIM, RdS/2013/248
- M. Fiorino, M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo, "Sviluppo, messa a punto e sperimentazione di un sistema combinato batterie al litio-ferro-fosfato/FER per applicazioni in bassa tensione. Rapporto 2 – Test e prove di funzionamento, anche in connessione con la rete elettrica di distribuzione", Università di Palermo DEIM, RdS/2013/249
- S. Barsali, R. Giglioli "Dimensionamento, realizzazione e verifica sperimentale delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica", Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/2013/250
- M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli "Individuazione delle sollecitazioni e criterio di dimensionamento di un accumulatore al litio inserito in una stazione di conversione di una tranvia metropolitana", Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/2013/251
- A. Paoletti, A. Pozio e P. P. Prosinì, "Studio preliminare su sistemi redox a flusso", ENEA, RdS/2013/252
- Birrozzi, F. Maroni, S. Calcaterra, M. Secchiaroli, F. Nobili, R. Marassi, "Studi di base per la gestione di batterie redox al vanadio", Università degli Studi di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie, RdS/2013/253
- M. Montanino, P. P. Prosinì, "Batterie metallo-aria: stato dell'arte e prospettive", ENEA, RdS/2013/254
- M. Brocco, E. Calò, A. Lucci, M. Pasquali, "Analisi costi e benefici sull'introduzione di sistemi di accumulo ad idrogeno e flow battery nella rete elettrica italiana", ENEA, RdS/2013/255
- M. R. Mancini, S. Frangini, C. Alvani, M. Falconieri, M. L. Grilli, "Recupero eco-sostenibile di materiali da batterie litio-ione esauste: studi preliminari", ENEA, RdS/2013/256
- U. Besi Vetrella, G. Celentano, G. Messina, L. Morici, "Studio di sistemi di accumulo basati su materiali superconduttori", ENEA, RdS/2013/257
- M. Conte, M. Brocco, E. Calò, A. Iacobazzi, P.P. Prosinì, "Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali relativi ai sistemi di accumulo", ENEA, RdS/2013/279

Progetto B.1.1

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

- P. P. Regina, N. Colonna "Test di funzionalità e aggiornamento della piattaforma A.I.D.A.", ENEA, RdS/2013/280
- M. Broglia, R. Ciccoli, S. Galli, P. Gislon, M. Granati, F. Petrazzuolo, S. Santomassimo, G. Monteleone, "Sperimentazione della produzione di biogas con impianto pilota DMM6000" ENEA, RdS 2013/277
- R. Ciccoli, A. Correnti, S. Orlandini, A. Farneti, M. Broglia, F. Petrazzuolo, L. Chiarini, S. Tabacchioni, M. Sperandei, V. Pignatelli "Sperimentazione in impianto pilota per la produzione di biogas da colture energetiche provenienti da terreni marginali non agricoli", ENEA, RdS 2013/123
- A. Aliboni, S. Cinquepalmi, E. De Luca, C. Felici, F. Fiocchetti, G. Izzo, A. Marone, G. Massini, V. Mazzurco Miritana, L. Mentuccia, C. Patriarca, S. Rosa, V. Sgulò, A. Signorini, C. Varrone, "Valorizzazione bioenergetica di scarti agro-zootecnici", ENEA, RdS 2013/183.
- A. Polettini, R. Pomi, E. Massi, "Sviluppo di processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno da matrici non convenzionali" Sapienza Università di Roma, RdS/ 2013/278
- S. Gorrasi, A. Aquilanti, P. Barghini, S. Silvi, M. Fenice "Degradazione di biomasse ad alto contenuto in polisaccaridi (ligno-cellulosa e chitina) tramite funghi filamentosi. Studio di processi aerobici con metodi tradizionali e modellizzazione RSM. Isolamento e studio di funghi anaerobici ruminali", Università della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche, RdS/2013/235
- F. Barbato, M. De Mei, S. Orlandini, V. Pignatelli, "Sistemi per la produzione di microalghe a fini di riciclo di digestato e fornitura di biomassa per biogas", ENEA, RdS/2013/177
- A. Bianco, A. Venditti, L. Guarcini "Controlli chimico-analitici relativi a digestato liquido e biomasse microalgali ottenute in prove di coltura per fini di riciclo del digestato e produzione di biogas", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di chimica, RdS 2013/281
- A. Molino, F. Nanna, A. Villone, "Specifica tecnica per la realizzazione di un impianto bench scale per la gassificazione in condizioni supercritiche di biomasse e risultati sperimentali in condizioni near-critiche", ENEA, RdS/ 2013/232
- M. Migliori, G. Giordano "Valutazioni energetiche di processi di trattamento idrotermali di differenti biomasse", Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali, RdS 2013/231
- V. Palma, D. Barba, "Dispositivi catalitici per l'abbattimento dell'H₂S da biogas" Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/175
- A. Molino, F. Nanna, P. Iovane, "Test sperimentali con membrane polimeriche per la purificazione del biogas da CO₂ e H₂S", ENEA, RdS 2013/234
- M.C. Annesini, R. Augelletti, P. De Filippis, M.L. Santarelli, N. Verdone "Analisi tecnico-scientifica di processi innovativi di upgrading del biogas a biometano: processi di separazione della CO₂ basati sulla formazione di idrati o sull'assorbimento con ammine in ambiente non acquoso", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente. RdS/2013/170
- S. Lai, F. Mani, M. Passaponti, P. Stoppioni "Studio dei processi chimico-fisici di upgrading del biogas a biometano con separazione di CO₂ mediante assorbimento con soluzioni amminiche in solvente organico", Università di Firenze, Dipartimento di Chimica "Ugo Schiff", RdS/2013/169
- S. Arca, E. D'Alessandro, "Apparati e condizioni operative per lo studio degli idrati di miscele metano/anidride carbonica", RDPower S.r.l., RdS 2013/181
- S. Arca, E. D'Alessandro, "Studio della separazione dei gas componenti il biogas mediante la formazione di idrati misti metano/CO₂" RDPower S.r.l. , RdS 2013/264
- A. Villone, F. Nanna, D. Barisano, "Definizione del set-up sperimentale per la realizzazione di una sezione a sorbenti di un impianto pilota per la rimozione della CO₂ dal syngas", ENEA RdS 2013/180
- L. Parabello, F. Micheli, K. Gallucci, L. Rossi, P.U. Foscolo, "Studio e sperimentazione sulla cattura del biossido di carbonio da miscele gassose tramite sorbenti" Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/179
- A. Molino, G. Braccio, "Analisi termodinamica e cinetica per il processo di produzione di gas naturale sintetico da syngas derivato dalla gassificazione delle biomasse e avvio della sperimentazione con l'impianto BIOSNG", ENEA, RdS 2013/233
- F. Basile, D. Barbera, G. Fornasari, R. Mafessanti, A. Vaccari, "Produzione e sperimentazione di catalizzatori per la metanazione del syngas da gassificazione di biomasse - Catalizzatori a base di idrotalciti", Università di Bologna, Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari", RdS/2013/168
- C. Amelio, S. Fassina, E. Ghisolfi, L. Mannarino, V. Naticchioni, G. Porotto, M. Timo, "Sviluppo e caratterizzazione di supporti ceramici per l'upgrading del syngas. Rapporto intermedio", FN S.p.A., RdS/2013/171
- C. Amelio, S. Fassina, E. Ghisolfi, L. Mannarino, V. Naticchioni, G. Porotto, M. Timo, "Sviluppo e caratterizzazione di supporti ceramici per l'upgrading del syngas. Rapporto finale", FN S.p.A., RdS/2013/172
- C. Amelio, S. Fassina, E. Ghisolfi, L. Mannarino, V. Naticchioni, G. Porotto, M. Timo, "Caratterizzazione di supporti e catalizzatori commerciali e sviluppo di supporti ceramici filtranti in Al₂O₃ ottenuti per estrusione. Rapporto intermedio", FN S.p.A., RdS/2013/173
- C. Amelio, S. Fassina, E. Ghisolfi, L. Mannarino, V. Naticchioni, G. Porotto, M. Timo, "Caratterizzazione di supporti e catalizzatori commerciali e sviluppo di supporti ceramici filtranti in Al₂O₃ ottenuti per estrusione. Rapporto finale", FN S.p.A., RdS/2013/174

- V. Palma, E. Meloni, "Sviluppo di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida", Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/176
- G. Stoppiello, M. Gualtieri, F. Hugony "Verifica sperimentale di filtri ceramici di tipo wall flow per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida", ENEA, RdS 2013/184
- S. Sau, E. Veca, A. Tizzoni, N. Corsaro, " Nitrati fusi come fluido termovettore intermedio. Confronto fra miscela binaria ed una ternaria contenente calcio", ENEA, RdS 2013/019
- G. Chiatti, F. Palmieri, "Studio dei parametri progettuali per la realizzazione di caldaie a sali fusi alimentate con biomasse lignocellulosiche", Università di Roma 3, Dipartimento di Ingegneria, RdS 2013/149
- M. Caldera, V. Gerardi, R. Roberto, "Implementazione di uno strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa", ENEA, RdS2013/263
- M. Astolfi, D. Bonalumi, E. Macchi, A. Giuffrida, C. Invernizzi, M. Romano, P. Silva, D. Turi, R. Roberto, V. Gerardi, M. Caldera, "Valutazione di cicli termodinamici innovativi per applicazioni con caldaie a sali fusi alimentate a biomassa legnosa" Politecnico di Milano, Dipartimento Energia, RdS/2013/178

Progetto B.1.3

Energia elettrica da fonte solare

Linea Progettuale 1. Ricerche su celle fotovoltaiche innovative

- P. Delli Veneri, L. V. Mercaldo, A. Agati, F. Formisano, I. Nasti "Sviluppo di processi di deposizione con tecnica PECVD ad alta frequenza per la realizzazione di film drogati p di silicio microcristallino e a base di ossido di silicio", ENEA, RdS/2013/001
- F. Buatier de Mongeot, C. Martella, C. Mennucci, E. M. Esposito, M. C. Giordano, D. Repetto, L.V. Mercaldo, P. Delli Veneri, "Nanostrutture auto-organizzate con funzionalità bio-mimetica per fotonica e fotovoltaico", Università di Genova, Dipartimento di Fisica - ENEA, RdS/2013/002
- A. Micco, G. Quero, A. Ricciardi, M. Pisco, A. Cusano, I. Usatii, E. Bobeico, V. La Ferrara L.V. Mercaldo, L. Verdoliva, P. Delli Veneri, "Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare", Università degli Studi del Sannio, Dipartimento di Ingegneria - ENEA, RdS/2013/003
- M.L. Addonizio, E. Gambale, A. Antonaia, M. Ferrara, A. Spadoni, "Sviluppo di tecniche per il trattamento superficiale di substrati di vetro per l'ottenimento di TCO ad alta efficienza di scattering della luce", ENEA, RdS/2013/004
- S. Daliento, M.L. Addonizio, P. Guerriero, E. Gambale, E. Napoli, "Modellazione ottica dello scattering di TCO testurizzati", Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione - ENEA, RdS/2013/005
- A. Aronne, M. L. Addonizio, S. Daliento, O. Tari, E. Fanelli, P. Pernice, "Analisi delle proprietà di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO prodotti per sol-gel", Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale e Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione - ENEA, RdS/2013/006
- L. Serenelli, M. Izzi, R. Chierchia, E. Salza, P. Mangiapane, M. Tucci, "Screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto sia su ITO che su ZnO", ENEA, RdS/2013/007
- M. Della Noce, E. Bobeico, A. De Maria, L. Lancellotti, V. La Ferrara, M. Izzi, M. Tucci, "Realizzazione di eterogiunzioni a contatto frontale su wafer di tipo p: ottimizzazione di passi di processo", ENEA, RdS/2013/008
- G. de Cesare, L. Serenelli, M. Tucci, "Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo e metallizzazioni per celle ad eterogiunzione silicio amorfo / silicio cristallino", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione - ENEA, RdS/2013/009
- C. Malerba, M. Valentini, F. Biccari, C. Azanza, M. Müller, E. Esposito, R. Chierchia, P. Mangiapane, E. Salza, A. Santoni, M. Capizzi, P. Scardi, A. Mittiga, "Sviluppo di processi di deposizione del CZTS: confronto critico delle diverse tecnologie", ENEA - Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica - Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Fisica, RdS/2013/010
- M. Valentini, C. Malerba, F. Biccari, C. Azanza, E. Esposito, R. Chierchia, P. Mangiapane, E. Salza, R. Sensoli, A. Santoni, M. Capizzi, P. Scardi, A. Mittiga, "Realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di Cu_2ZnSnS_4 con efficienza superiore al 5%", ENEA - Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica - Sapienza Università di Roma, RdS/2013/011
- A. Mucci, F. Parenti, L. Schenetti, E. Libertini, R. Ricciardi, R. Diana, A. Citarella, P. Morvillo, "Sintesi e caratterizzazione di nuovi polimeri semiconduttori per celle fotovoltaiche organiche", Università di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche - Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Chimica - ENEA, RdS/2013/012
- C. De Rosa, C. Diletto, R. Ricciardi, F. Auriemma, R. Diana, G. Pandolfi, P. Morvillo, "Materiali nanostrutturati a base di copolimeri a blocchi per celle fotovoltaiche", Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Scienze Chimiche - ENEA, RdS/2013/013
- P. Maddalena, R. Rega, A. Grimaldi, M. G. Maglione, P. Tassini, P. Morvillo, C. Minarini, "Analisi del degrado di materiali e di celle fotovoltaiche organiche indotto da stress termico", Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Scienze Fisiche - ENEA, RdS/2013/014

Linea Progettuale 2. Solare termodinamico

- A. Antonaia, S. Esposito, A. Guglielmo, M.L. Addonizio, M. Ferrara, A. Castaldo, "Coating solari innovativi: tecnica IBAD per film sottili metallici e ceramici ad alta compattezza morfo-strutturale", ENEA, RdS/2013/076
- V. Russo, R. Liberatore, "Analisi tecnico-economica di impianti solari a collettori parabolici lineari", ENEA, RdS/2013/077
- A. De Luca "Valutazione dell'utilizzo di fluidi gassosi in impianti solari termodinamici", ENEA, RdS/2013/078
- A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau, "Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle, da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico", ENEA, RdS/2013/079
- F. Fabrizi, W. Gaggioli, L. Rinaldi, P. Tarquini, "Caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo a sali fusi dell'Impianto Sperimentale PCS del C.R. Casaccia dell'ENEA", ENEA, RdS/2013/080
- M. Falchetta, "Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali: rapporto sulle attività svolte", ENEA, RdS/2013/167
- J. M. Kenny, M. Chieruzzi, "Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a media temperatura costituito da una miscela di sali e nanoparticelle", Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/2013/081
- A. Androver "Stato dell'arte, selezione e caratterizzazione di materiali a cambiamento di fase (PCM). Analisi in ciclo termico e studio preliminare della conducibilità termica tramite Hot-Wire method", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/2013/082
- G. Chiatti, F. Palmieri, "Studio e progettazione preliminare di impianti di cogenerazione innovativi di piccola taglia alimentati da sistemi di accumulo termico a sali fusi di impianti solari a concentrazione", Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria, RdS/2013/083

Progetto B.1.4

Studi e Valutazioni sulla produzione di energia elettrica da correnti marine e moto ondoso

- L. La Porta, E. Lombardi, M. Pollino, A. Carillo, E. Caiaffa, G. Sannino, "Sviluppo di modelli meteo-marini per la previsione del moto ondoso in aree portuali italiane: produzione di mappe energetiche e visualizzazione web-gis", ENEA, RdS/2013/229
- A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino, "Rapporto di sintesi sulla realizzazione di un sistema operativo per la previsione dell'energia da moto ondoso", ENEA, RdS/2013/085
- T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione, "Caratteristiche costruttive dei sistemi OWC e dei power take-off a questi applicabili", ENEA, RdS/2013/086
- F. Arena, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, A. Viviano, "Elaborazione dati meteomari da modelli numerici ad alta risoluzione e definizione degli stati di mare lungo le coste del Mediterraneo", Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali, RdS/2013/137
- F. Arena, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, A. Viviano, "Ottimizzazione di dispositivi U-OWC (Oscillating Water Column) e progettazione di test sperimentali", Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali, RdS/2013/138
- T. Crescenzi, D. Nicolini, A. Fontanella, L. Sipione, "Sviluppo di un modello numerico per simulazioni CFD di sistemi di conversione del moto ondoso tipo U-OWC (Oscillating Water Column)", ENEA, RdS/2013/230
- D.P. Coiro, G. Troise, F. Lionello, Misura del profilo di corrente marina nello Stretto di Messina ai fini della stima della produzione di energia elettrica", Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale - EolPower Group, RdS/2013/087
- G. Sannino, A. Carillo, E. Lombardi, T. Ciuffardi, "Validazione del modello di circolazione Marina dello Stretto di Messina mediante dati acquisiti in situ", ENEA, RdS/2013/228
- G. Mattiazio, E. Giorcelli, D. Poggi, G. Sannino, A. Carillo, "Progettazione di un sistema di produzione di energia da moto ondoso in scala reale", Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale - ENEA, RdS/2013/084

Progetto B.2

Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

- V. Barbarossa, G. Vanga, R. Viscardi, "Assorbimento di CO₂ con soluzioni basiche di resorcinolo", ENEA, RdS/2013/225
- F. Barzagli, S. Lai, F. Mani, A. Scozzafava, "Indagini sperimentali sulla cattura di CO₂ con nuovi metodi a basso consumo energetico", Università di Firenze, Dipartimento di Chimica "Ugo Schiff", RdS/2013/193
- D. Pinna, M. Porru, M. Errico, R. Baratti, "Attività di modellistica dei sistemi CCS. Analisi dinamica e controllo di impianti di cattura postcombustione della CO₂ al variare delle condizioni di esercizio", Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, RdS/2013/194
- G. Cau, D. Cocco, V. Tola, "Analisi dell'integrazione di impianti di cattura post-combustione della CO₂ con fonti rinnovabili", Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, RdS/2013/195
- G. Calì, F. Tedde, P. Miraglia, D. Multineddu, A. Plaisant, "Modifiche e migliorie degli impianti", Sotacarbo, RdS/2013/196
- E. Loria, G. Calì, C. Frau, P. Miraglia, "Sperimentazione sistemi di cattura post-combustione", Sotacarbo, RdS/2013/197
- A. Orsini, D. Multineddu, A. Plaisant, R. Cara, E. Loria, "Attività di caratterizzazione dei sistemi di campionamento e analisi di solidi, gas e liquidi", Sotacarbo, RdS/2013/198

- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, A. Dedola, "Attività di ottimizzazione del processo di gassificazione del carbone" ENEA, RdS/2013/199
- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, "Attività sperimentale di produzione di SNG", ENEA, RdS/2013/200
- M.G. Cutrufello, I. Ferino, R. Monaci, E. Rombi, C. Cannas, A. Musinu "Sintesi e sperimentazione di materiali innovativi per il trattamento e conversione del syngas per la produzione di SNG", Università di Cagliari, Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, RdS/2013/201
- B. de Caprariis, P. De Filippis, A. Petruccio, M. Scarsella, N. Verdona, "Purificazione del syngas mediante processi catalitici", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/2013/202
- S. Cassani, A. Assettati, L. Pagliari, M. Nobili, S. Stendardo "Realizzazione di un prototipo sperimentale per lo studio di tecnologie low carbon: la piattaforma VALCHIRIA", ENEA, RdS/2013/203
- A. Donatelli, C. Innella, P. Iovane, P. Garzone, "Pirolisi del carbone Sulcis", ENEA, RdS/2013/261
- A. Pettinau, G. Calì, F. Tedde, "Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione di carbone e biomasse presso la piattaforma pilota SOTACARBO", Sotacarbo, RdS/2013/204
- G. Calì, P. Miraglia, E. Loria, "Sperimentazione di sistemi di cattura pre-combustione", Sotacarbo, RdS/2013/205
- A. Plaisant, D. Multineddu, A. Orsini, R. Cara, "Caratterizzazione di campioni di carboni e biomasse per applicazioni di generazione di energia elettrica", Sotacarbo, RdS/2013/206
- C. Bassano, P. Deiana, "Impianti Coal to Liquid integrati con tecnologie CCS. Analisi economica e di redditività", ENEA, RdS/2013/207
- M. Martinelli, C.G. Visconti, L. Lietti, P. Forzatti, "Studio di processi di produzione di combustibili liquidi e gassosi da carbone con riutilizzo della CO₂", Politecnico di Milano, Dipartimento Energia, RdS/2013/208
- S. Stendardo, G. Vanga, "Studio delle prestazioni del sorbente CaO/Ca₁₂Al₁₄O₃₃ sottoposto ad elevati cicli di carbonatazione - rigenerazione", ENEA, RdS/2013/209
- I. Aloisi, G. Taglieri, P.U. Foscolo, "Caratterizzazione strutturale e morfologica di sorbenti dell'anidride carbonica" Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/210
- T. Antonini, P.U. Foscolo, K. Gallucci, "Elementi a membrana semipermeabile per l'apporto di ossigeno nella gassificazione del carbone e nel reforming del metano", Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/265
- S. Stendardo, P.U. Foscolo, "Modellazione ed analisi parametrica di una particella composita per la cattura della CO₂ ed il reforming di CH₄", Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/266
- I. Cassani, P.U. Foscolo, "Modellazione di un processo di decarbonizzazione e reforming del metano: start-up della sezione di cattura della CO₂ dell'impianto ZECOMIX", Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/262
- S. Stendardo, G. Messina, S. Scaccia, G. Vanga, L. Pagliari, S. Cassani, M. Nobili, A. Assettati, G. Guidarelli, S. Attanasì, I. Cassani, P.U. Foscolo, "Prove sperimentali di gassificazione del carbone e separazione della CO₂ attraverso sorbenti solidi: esperienza condotta sulla Piattaforma ZECOMIX", ENEA - Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/211
- D. Cecere, E. Giacomazzi, F.R. Picchia, N. Arcidiacono, "Un metodo per il trattamento di geometrie complesse in griglie cartesiane sfalsate", ENEA, RdS/2013/212
- A. Di Nardo, G. Calchetti, D. Cecere, E. Giacomazzi, "Studio del bruciatore PRECCINSTA mediante simulazioni CFD di tipo RANS e LES" ENEA, RdS/2013/213
- E. Giacomazzi, D. Cecere, F.R. Picchia, N. Arcidiacono, "Sviluppo di un modello di combustione generalizzato per la Large Eddy Simulation di fiamme premiscelate", ENEA, RdS/2013/214
- G. Rossi, B. Favini, "Sviluppo di tecniche numeriche per LES nel codice HeART e simulazioni numeriche per lo studio di processi di combustione di miscele multifase", Sapienza Università di Roma, Dipartimento Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale, RdS/2013/215
- G. Calchetti, A. Di Nardo, "Ossicombustione di polverino di carbone: studio CFD di un combustore sperimentale" ENEA, RdS/2013/216
- T. Faravelli, E. Ranzi, A. Frassoldati, T. Maffei, "Modellazione della cinetica di ossidazione e pirolisi della frazione volatile da carbone", Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta", RdS/2013/217
- E. Giulietti, C. Stringola, R. Camusi, A. Di Marco, "Caratterizzazione aeroacustica di un bruciatore non convenzionale di tipo Trapped Vortex", ENEA - Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria, RdS/2013/218
- E. Giulietti, S. Chiochini, C. Stringola, L. Pagliari, S. Cassani, E. Giacomazzi, "Modifica di un bruciatore commerciale per turbogas di potenza, al fine di ampliare il range di funzionamento stabile e quindi la load flexibility", ENEA, RdS/2013/219
- A. Di Nardo; G. Calchetti, D. Cecere, E. Giacomazzi, E. Giulietti, R. Camussi, A. Di Marco, A. Moscati, "Simulazioni CFD del Bruciatore ETVB-Mod1", ENEA-Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria, RdS/2013/260
- G. Messina, A. Assettati, A. Grasso, G. Guidarelli, C. Stringola, "Modifiche integrazioni ed esercizio dell'impianto AGATUR", ENEA, RdS/2013/220
- G. Messina, "Modello dinamico della microturbina TURBEC T100", ENEA, RdS/2013/221

- A. Di Nardo, G. Calchetti, "Simulazione di un combustore per turbogas, in condizioni di ossi-combustione, per cicli termodinamici a CO₂", ENEA, RdS/2013/222
- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, "Attività di supporto al monitoraggio della CO₂ nell'area del Sulcis", ENEA, RdS/2013/223
- S. Lombardi, S. Colella, S. Graziani, M.C. Tartarello, "Realizzazione e valorizzazione del CCS nel Sulcis", Sapienza Università di Roma, Centro di Ricerca per la Previsione Prevenzione e Controllo dei Rischi (CERI), RdS/2013/224
- S. Lombardi, S. Graziani, A. Annunziatellis, M.C. Tartarello, "Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO₂ e loro applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis", Sapienza Università di Roma, Centro di Ricerca per la Previsione Prevenzione e Controllo dei Rischi (CERI), RdS/2013/270
- P. Bartolomei, A. Rizzo, C. Canducci, R. Levizzari, D. Marseglia, A. Piccoli, C. Andreozzi, J. De Sanctis, "Monitoraggio isotopico delle eventuali perdite di CO₂ dai depositi geologici", ENEA, RdS/2013/269
- V. Barbarossa, G. Vanga, "Conversione di CO₂ in metano", ENEA, RdS/2013/192
- R. Baciocchi, G. Costa, M. Morone, D. Zingaretti, "Valorizzazione delle ceneri prodotte dal processo ZECOMIX e integrazione del processo di carbonatazione per lo stoccaggio minerale di CO₂", Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, RdS/2013/226
- G. Girardi, "La presenza italiana in campo internazionale per il coordinamento strategico e programmatico nel settore delle tecnologie di cattura e stoccaggio della CO₂ (CCS)", ENEA, RdS/2013/227

Progetto B.3.1

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione

Linea Progettuale 1. Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

- A. Ventura, "Effetti di struttura nucleare sulla fissione neutronica di 239Pu", ENEA, RdS/2013/055
- M. Pescarini, V. Sinitisa, R. Orsi, M. Frisoni, "BUGENDF70.BOLIB - An ENEA-Bologna ENDF/B-VII.0 Cross Section Library (47 n + 20 γ) in FIDO-ANISN Format for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications", ENEA, RdS/2013/056
- K. W. Burn "Use of Monte Carlo in State-of-the-Art PWR Design: Study of Tilt in the NEA UAM PWR Benchmark and Development and Testing of New Algorithms within Monte Carlo Eigenvalue Calculations employing the Source-Iteration Method", ENEA, RdS/2013/057
- G. Glinatsis, G. Grasso, D. Mattioli, R. Pergreffi, F. Rocchi, "Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900 MWe", ENEA, RdS/2013/058
- D. Mattioli, R. Pergreffi, F. Rocchi, "Acquisizione del codice FLICA: metodi di calcolo utilizzati nei codici francesi per l'analisi termoidraulica di nocciolo dei PWR", ENEA, RdS/2013/059
- G. Bandini, R. Calabrese, N. Davidovich, F. De Rosa, S. Ederli, F. Rocchi, M. Di Giuli, M. Sumini, F. Teodori, W. Ambrosini, A. Manfredini, F. Oriolo, "Calcoli e validazioni relativi ai codici di calcolo specifici per l'analisi degli incidenti gravi", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/060
- F. Padoani, G. Glinatsis, A. Luce, A. Rizzo, R. Levizzari, F. Rocchi, C. Petrovich, F. Rossi, A. Guglielmelli, "Metodi per valutazioni di sostenibilità legati a resistenza alla proliferazione, ciclo del combustibile, interfaccia safety/security e scenari energetici", ENEA, RdS/2013/061
- C. Artioli, C. Bustreo, G. Meneghini, I. Vignotto, G. Zollino, C. Petrovich, "Una mappa delle emissioni specifiche e del costo medio di generazione di diversi mix elettrici", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/062
- F. Rocchi, A. Guglielmelli, M. Sumini, F. Teodori, "Calcoli di inventario di nocciolo: affinamento della metodologia ed applicazione ai reattori frontaliere", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/063
- C. Lombardo, G. Caruso, F. Giannetti, D. Vitale Di Maio, "Calcoli per la caratterizzazione dei vari impianti nucleari in condizioni di incidenti gravi", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/064
- F. Bertozzi, "Realizzazione di un data base esperto a supporto della gestione di una situazione di crisi", ENEA, RdS/2013/065
- E. Negrenti, C. Parisi, "Sviluppo di una catena di simulazione fast-running per le fasi avanzate dell'incidente", ENEA, RdS/2013/066
- L. Burgazzi, A. Cervone, N. Davidovich, P. Meloni, G. Forasassi, R. Lo Frano, G. Pugliese, "Rapporto tecnico sulle metodologie di analisi degli eventi esterni e stima del rischio", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/067
- L. Burgazzi, G. Bianchini, A. Cervone, M. Polidori, F. Giannetti, D. Vitale Di Maio, T. Murgia, L. Ferroni, A. Naviglio, "Confronto e valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi in reattori innovativi a fronte di sequenze incidentali significative ai fini della sicurezza", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/068
- S. Boarin, M.E. Ricotti, "Valutazione dei costi per la realizzazione della configurazione originale della Facility SPES-3 presso la SIET- Parte A", CIRTEN, RdS/2013/069
- G. Cattadori, A. Luce, "Valutazione dei costi per la realizzazione della configurazione originale della Facility SPES-3 presso la SIET- Parte B", SIET, RdS/2013/070
- C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella "Fattibilità di una diversa configurazione della facility SPES3", ENEA - CIRTEN, RdS/2013/071
- M. De Salve, G. Monni, B. Panella, "Prove sperimentali e modello numerico dello Spool Piece (costituito da Venturi e misuratore di grado di vuoto) in deflusso bifase", CIRTEN, RdS/2013/072

- C. Randaccio, “Relazione tecnica sulla messa a punto della strumentazione per la misura della portata bifase nella facility SPES-3”, SIET, RdS/2013/073
- N. Forgiione, N. Sanzo, F. Venturi, “Code validation and model qualification for problems of mixing and thermal exchange in innovative reactors”, CIRTEN, RdS/2013/074
- M. Santinello, A. Cammi, M. E. Ricotti, “Validazione di codici e qualifica modelli per problematiche di scambio termico in generatori di vapore innovativi”, CIRTEN, RdS/2013/075

Linea Progettuale 2. Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

- L. Ferroni, F. Giannetti, J. Manzano, M. Ciotti, “Studi di sostenibilità sui sistemi nucleari refrigerati a piombo”, ENEA-CIRTEN, RdS/2013/015
- M. Ciotti, “Rapporto sull’utilizzo del reattore TAPIRO a supporto dello sviluppo dei sistemi LFR”, ENEA, RdS/2013/016
- M. Carta, V. Peluso, G. Bianchini, A. Gandini, V. Fabrizio, L. Ricci, “Esperienza GUINEVERE critica con combustibile metallico. Analisi coefficienti di correlazione con MHYRRA”, ENEA-CIRTEN, RdS/2013/017
- G. Bianchini, V. Peluso, V. Fabrizio, S. Dulla, M. Nervo, P. Ravetto, “ALFRED reactor: evaluation of multi temperature cross section sets by deterministic and stochastic methods”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/018
- G. Grasso “Caratterizzazione Neutronica e termoidraulica del nocciolo di AFRODITE”, ENEA, RdS/2013/020
- R. Bonifetto, L. Savoldi Richard, R. Zanino, A. Del Nevo, “Validation of the 1D+2D thermal-hydraulic module of the FRENETIC code”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/021
- L. Luzzi, G. Pastore, P. Botazzoli, “Modelli di rilascio dei gas di fissione per combustibili MOX ad elevato burnup”, CIRTEN, RdS/2013/022
- D. Rozzia, N. Forgiione, A. Ardizzone, A. Del Nevo, “Validazione e analisi dei gas di fissione in combustibili MOX ad elevato burnup” ENEA-CIRTEN, RdS/2013/023
- D. Rozzia, N. Forgiione, A. Ardizzone, A. Del Nevo, “Analisi del comportamento del combustibile MOX ad elevato burnup in condizioni di normal operation e DBA”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/024
- A. Del Nevo, C. Venturi, E. Martelli, D. Rozzia, F. Castiglia, M. Giardina, F. Mascari, M. L. Richiusa, G. Vella, “Qualifica di codici di calcolo dedicati alle analisi di sistema avanzati quando applicati nella simulazione di impianti a metallo liquido”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/025
- C. Parisi, F. Giannetti, A. Naviglio, “Determinazione dei parametri di sicurezza del core e dell’andamento del burnup di un reattore veloce refrigerato a metallo liquido” ENEA-CIRTEN, RdS/2013/026
- I. Di Piazza, “Analisi di uno scenario di flow-blockage”, ENEA, RdS/2013/027
- I. Di Piazza, “Analisi di uno scenario di parziale congelamento del sistema primario”, ENEA, RdS/2013/028
- E. Negrenti, B. Fresilli, G. Di Costanzo, M. D’Apice, C. Innarella, C. Parisi, M. Serra, A. Tripi, M. Cappelli, “Studio preliminare di fattibilità di un sistema di simulazione per l’analisi di sicurezza e per la progettazione dei sistemi di controllo di reattori a metallo liquido pesante”, ENEA, RdS/2013/029
- R. Remetti, L. Lepore, M. Cappelli, “Analisi dei sistemi di strumentazione e controllo previsti in alcuni progetti su reattori al piombo attualmente in sviluppo a livello internazionale”, ENEA-CIRTEN, RdS/2013/030
- G. Forasassi, R. Lo Frano, G. Pugliese, “Messa a punto e sviluppo di metodologie e analisi per la valutazione preliminare del fenomeno della core compaction” CIRTEN, RdS/2013/031
- G. De Angelis, C. Fedeli, M. Capone, G.A. Marzo, G. Tiranti, M. De Salve, “Studio sulle tecniche di abbattimento degli off-gas in un reattore LFR”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/032
- G. De Angelis, C. Fedeli, R. Calvigioni, M. Capone, G.A. Marzo, G. Tiranti, M. De Salve, “Studio delle interazioni tra gas di fissione e refrigerante in un reattore LFR”, ENEA, RdS/2013/033
- G. De Angelis, C. Fedeli, G. Tiranti, E. Baicchi, “Rapporto sul processo di pirometallurgia mediante l’impianto pilota Pyrel III”, ENEA, RdS/2013/034
- E. Macerata, M. Mariani, E. Mossini, M. Giola, “Tecniche di riprocessamento del combustibile irraggiato per sistemi “adiabatici” CIRTEN, RdS/2013/035
- G. De Angelis, C. Fedeli, E. Macerata, E. Mossini, G. Dia, A. Tosolin, M. Mariani, M. Giola, “Rapporto sulla interazione fuel-coolant in sistemi LFR”, ENEA - CIRTEN, RdS/2013/036
- A. Bellucci, S. Lionetti, F. Lamastra, F. Nanni, “Sviluppo di sistemi multilayer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo”, CSM - Università di Roma Tor Vergata, RdS/2013/037
- F. Nanni, F.R. Lamastra, M. Valentini, F. Garcia Ferré, M. Beghi, F. Di Fonzo, “Sviluppo di layer per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo mediante tecniche di ablazione laser”, CIRTEN-Università di Tor Vergata, RdS/2013/038
- F. Garcia Ferré, M. Beghi, F. Di Fonzo, “Rapporto sulla progettazione di prove di irraggiamento con ioni pesanti di coating realizzati mediante ablazione laser”, CIRTEN, RdS/2013/039
- A. Gessi, “Rapporto sulla installazione e collaudo di una macchina per Detonation Spray”, ENEA, RdS/2013/040
- A. Coglitore, G. Raiteri, M. Scafè, “Rapporto sulla messa a punto di prove meccaniche in piombo liquido stagnante per la caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti per applicazioni nucleari”, ENEA, RdS/2013/041

- E. Ghisolfi, "Rapporto tecnico di fine fabbricazione di elementi prototipici del sistema primario dell' LFR", FN SpA, RdS/2013/042
- A. Antonelli, "Rapporto sulla implementazione del laboratorio della chimica del piombo", ENEA, RdS/2013/043
- A. Antonelli, "Rapporto sulla implementazione di strutture per la pulizia di grossi componenti operanti in piombo" ENEA, RdS/2013/044
- D. Rozzia, A. Del Nevo, M. Tarantino, P. Gaggini, D. Vitale Di Maio, G. Caruso, L. Gramiccia, "Fornitura scambiatore di calore a tubi a baionetta" ENEA - CIRTEN, RdS/2013/045
- M. Tarantino, P. Gaggini, I. Di Piazza, P. Agostini, N. Forgiione, D. Martelli, G. Barone "CIRCE Experimental Report", ENEA - Università di Pisa, RdS/2013/046
- M. Tarantino, P. Agostini, L. Cinotti, "Rapporto di prova e analisi dei risultati sperimentali ottenuti per la qualifica del prototipo di GV a spirale piana per sistemi LFR", ENEA, RdS/2013/047
- L. Mengali, M. Lanfredini, F. Moretti, F. D'Auria, "Rapporto sull'accoppiamento di codici CFD e codici di sistema", CIRTEN, RdS/2013/048
- G. Barone, N. Forgiione, D. Martelli, W. Ambrosini, "Rapporto sull'accoppiamento di codici CFD e codici di sistema in sistemi a piscina ed a loop", CIRTEN, RdS/2013/049
- D. Cerroni, S. Manservigi, E. Vincenzi, "Sviluppo codice FEM-LCORE per la simulazione del regime transitorio", CIRTEN, RdS/2013/050
- I. Di Piazza, P. Gaggini, "Progetto del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA", ENEA, RdS/2013/051
- I. Di Piazza, M. Tarantino, P. Gaggini, "Main Process for the Logical Control of the HELENA Loop", ENEA, RDS/2013/052
- I. Di Piazza, P. Gaggini, "Progetto del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE", ENEA, RdS/2013/053
- I. Di Piazza, P. Gaggini, "Up-Grade impianto a metallo liquido NACIE", ENEA, RdS/2013/054

Progetto B.3.2

Attività di fisica della fusione complementari a ITER

- A. Cucchiario, G. M. Polli, "2013 Advances in the Manufacturing Activities for the Supply of 9 TF coils of JT-60SA Tokamak and Associated Validation Program", ENEA, RdS/2013/185
- A. Cucchiario, P. Rossi, L. Di Pace, G. Brolatti, "Stato delle attività contrattuali per la realizzazione delle prime 3 casse di contenimento di JT-60SA", ENEA, RdS/2013/186
- A. Cucchiario, P. Rossi, L. Di Pace, G. Brolatti, "Documenti di progettazione delle casse di contenimento di JT-60SA", ENEA, RdS/2013/259
- A. Lampasi, P. Costa, G. Maffia, F. Starace, P. Zito, "Prototipo di sistema di commutazione veloce da 20 kA DC per applicazioni di fusione nucleare", ENEA, RdS/2013/187
- P. Zito, P. Costa, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace, "Ingegnerizzazione di 8 sistemi di alimentazione elettrica per l'esperimento internazionale JT-60SA", ENEA, RdS/2013/188
- A. Tincani, A. Aiello, S. Mannori, C. Lenzi, G. Fasano, M. Muzzarelli, "Realizzazione e qualifica dell'impianto sperimentale per prove di corrosione/erosione in litio (LIFUS6)", ENEA, RdS/2013/124
- P. Favuzza, A. Antonelli, "Rapporto sulla procedura offline di analisi chimica della concentrazione di azoto in litio" ENEA, RdS/2013/125
- P. Favuzza, "Rapporto sulla validazione del sistema di purificazione del litio all'interno di Lifus 6 e del sistema di monitoring online di tali impurezze", ENEA, RdS/2013/126
- G. Miccichè, D. Bernardi, "Rapporto di fabbricazione del prototipo del target assembly", ENEA, RdS/2013/127
- G. Miccichè, D. Bernardi, "Fabbricazione del sistema Fast Disconnecting System (FDS) per la giunzione delle tubazioni da remoto e validazione delle procedure di manutenzione remotizzata", ENEA, RdS/2013/128
- G. Miccichè, F. Frascati, L. Lorenzelli, "Rapporto sulla progettazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target di IFMIF", ENEA, RdS/2013/129
- D. Bernardi, M. Porfiri, T. Pinna, M. Frisoni, G. Miccichè, M. Serra, "Rapporto sulla progettazione finale del target assembly a baionetta completo di disegni e dei dispositivi per la sua manutenzione remotizzata", ENEA, con il contributo di: P.A. Di Maio, P. Arena, G. Bongiovì (Università di Palermo), B. Knaepen, A. Prakash, M. Caby (Università di Bruxelles, ULB), F. Becchi, M. Morando (Telerobot SpA), RdS/2013/130
- E. Ferrari, S. Baccaro, "Realizzazione di pannelli e campioni in SiC/SiC come componenti funzionali e strutturali" - lac 058 r389", FN SpA, RdS/2013/189
- S. Tosti, A. Moriani, F. Marini, A. Santucci, "Erosion/Corrosion of SiC and SiC/SiC in liquid metal", ENEA, RdS/2013/190
- F. Crisanti, G. Ramogida, G. Di Gironimo, G. Esposito, R. Mozzillo, F. Lucca, "Sviluppo di nuove configurazioni di plasma e di un nuovo divertore per l'esperimento FAST", ENEA-CREATE-LT Calcoli Merate, RdS/2013/191
- F. Crisanti, G. Ramogida, G. Di Gironimo, G. Esposito, R. Mozzillo, "Studio preliminare di fattibilità di un tokamak derivato da FAST compatibile con le configurazioni di plasma "Super X" ENEA-CREATE, RdS/2013/258
- G. Pruneri, Rapporto finale "Engineering Validation and Engineering Design Activities", Consorzio RFX, RdS/2013/282

- “Relazione finale - Contratto di appalto per attività di sviluppo dei sistemi di alimentazione elettrica dei magneti di JT-60SA”, Consorzio RFX, RdS/2013/283
- G. Pruneri, Rapporto preliminare “Engineering Validation and Engineering Design Activities”, Consorzio RFX, RdS/2013/284

Progetto C.1

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

- B. Di Pietra, G. Puglisi con il contributo di I. Bertini, G. Azzolini, G. Graditi, V. Cigolotti, L. Pazzola, A. Tundo, “Implementazione di sistemi poligenerativi a servizio di reti termiche locali”, ENEA, RdS/2013/118
- F. Bonfà, B. Di Pietra, G. Puglisi, con il contributo di F. Zanghirella, “Sviluppo di un modello di rete termica per il teleraffrescamento e valutazione delle differenti configurazioni impiantistiche”, ENEA, RdS/2013/116
- B. Di Pietra, G. Puglisi, con il contributo di I. Bertini, A. Federici, “Validazione di un modello integrato tra tecnologie a fonte rinnovabile e trigenerazione”, ENEA, RdS/2013/117
- E. Riva Sanseverino, M. L. Di Silvestre, G. Zizzo, I. Bertini, G. Graditi, B. Di Pietra, “Implementazione di funzioni aggiuntive per la rappresentazione e la gestione ottimizzata di risorse energetiche distribuite in un distretto energetico. Simulazione di scenari in ambiente integrato”, Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell’Informazione e Modelli Matematici - ENEA, RdS/2013/104
- M. Badami, A. Portoraro, “Studio e caratterizzazione di reti termiche distribuite”, Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, RdS/2013/105
- L. Martirano, M.C. Falvo, D. Sbordone, “Sistemi di monitoraggio e controllo per la poligenerazione nelle reti locali: caso applicativo del centro Enea di Casaccia”, Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/2013/103
- C. Landi, D. Gallo, M. Luiso, G. Graditi, V. Cigolotti, “Metriche di misura avanzate ed architetture di concentratori dati intelligenti per reti integrate di servizi”, Seconda Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell’Informazione - ENEA, RdS/2013/136
- M. Annunziato, C. Meloni, F. Pieroni, S. Pizzuti, S. Romano, “Gestione integrata di una rete di edifici in uno Smart Village secondo il principio dell’energy on demand: implementazione e test di funzioni real time di modellazione di utenza, diagnosi ed utilizzo adattivo della energia elettrica”, ENEA, RdS/2013/119
- G. Comodi, A. Fonti, A. Giantomassi, F. Polonara, S. Longhi, “Simulatore di reti di edifici per la messa a punto di strategie di controllo. Applicazione e validazione sperimentale su una rete di edifici”, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/2013/120
- S. P. Corngati, A. Capozzoli, F. Lauro, D. Raimondo, N. Talà, “Metodi per l’analisi prestazionale di reti di edifici e test su dati sperimentali e simulatore”, Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, RdS/2013/121
- F. Moretti, S. Panziersi, “Metodologia di ottimizzazione multi-obiettivo della climatizzazione termica di edifici. Validazione su sistema di simulazione”, Università Roma Tre, Dipartimento Informatica e Automazione, RdS/2013/122
- P. Manini, V. Criscuolo, S. Aprano, M. G. Maglione, P. Tassini, C. Minarini, “Sintesi e caratterizzazione di materiali innovativi per applicazioni OLED”, ENEA - Università di Napoli “Federico II”, Dipartimento Scienze Chimiche - SESMAT S.r.l., RdS/2013/115
- L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli, G. Leonardi, V. Tarantini R. Pollidori, E. Rusconi A. Frascione, A. Antonelli, “Metodi sperimentali per la valutazione della qualità della luce. Sviluppo di sistemi a LED”, ENEA, RdS/2013/114
- A. Di Gregorio, R. Chierici N. Gozo, “Progetto Lumière: sviluppo di un tool per la qualità di gestione degli impianti illuminotecnici”, CRIET - ENEA, RdS/2013/110
- M. Annunziato, S. Fumagalli, G. Giuliani, N. Gozo, C. Honorati Consonni, “Progetto Lumière. Programma e strumenti per una gestione efficiente ed efficace della luce pubblica”, ENEA, RdS/2013/111
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante, “Advance LED Lighting Design: Relazione tecnica Attività B.1, Ricerca e sviluppo progetto PLUS ME”, Politecnico di Milano, Dipartimento di Design, RdS/2013/112
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante, “Fosfori remoti per l’illuminazione di Interni”, Politecnico di Milano, Dipartimento di Design, RdS/2013/113
- A. Rizzi, C. Bonanomi, L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli, “Metodi sperimentali per la quantificazione dell’indice di resa cromatica di una sorgente luminosa e studio di approcci computazionali alternativi di tipo percettivo”, Università di Milano, Dipartimento di Informatica - ENEA, RdS/2013/108
- C. Burattini, F. Gugliermetti, F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini, F. Bisegna, “Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sugli aspetti percettivi e circadiani”, Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/2013/109
- R. Fioretti, P. Principi, “Realizzazione di strutture multistrato contenenti materiali a cambiamento di fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere: analisi teorica e sperimentale”, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/2013/101
- A. Giocoli, M. Mongelli, I. Rosselli, M. Schwarz, A. Tati, “Caratterizzazione di strutture multistrato per celle frigorifere tramite prove non distruttive (PND) e sollecitazione dinamica”, ENEA, RdS/2013/102

- M. V. Russo, I. Fratoddi, I. Venditti, "Preparazione di materiali nanostrutturati innovativi a base polimerica e compositi come assorbitori di etilene prodotto dalla frutta nelle fasi di stoccaggio", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Chimica, RdS/2013/106
- L. Quercia, D. Palumbo, P. Di Lorenzo, F. Lazzaroni, "Caratterizzazione mediante naso elettronico della conservazione di ortofrutta in cella frigorifero per l'allestimento di un laboratorio progettato per lo sviluppo di array di sensori a basso costo al fine di contenere i consumi energetici mediante il monitoraggio e controllo dell'atmosfera all'interno delle celle refrigerate", ENEA, RdS/2013/107

Progetto C.2

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

- S. Ferrari, "Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici - Analisi dei consumi elettrici del parco edifici del Politecnico di Milano", Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, RdS/2013/139
- E. Santini, S. Elia, "Analisi e raccolta dei dati di consumo dei centri sportivi, disponibili presso il CONI Servizi di Roma, e delle possibili attività di ottimizzazione delle piscine", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/2013/140
- S. Baldazzi, E. Beltrone, P. D'Alessandris, A. Mostacci, A. Mura, D. Napoleoni, F. Pasquino, A. Santangelo, A. Stemperini, F. Toso, "Rapporto sulla raccolta dati per la determinazione e caratterizzazione delle tipologie di impianto per il condizionamento invernale ed estivo negli edifici destinati a scuole ed uffici", CRESME, RdS /2013/141
- F. Gugliermetti, F. Laudani, F. Bisegna, "Definizione di criteri di diagnosi per una correzione delle stime di consumi energetici dovuti all'illuminazione", Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/2013/142
- W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, P. Conti, E. Schito, G. Diodato, S. Moncelli, P. Signoretti, G. Fasano, "Realizzazione di un software con interfaccia grafica per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale, uffici e scuole" Università di Pisa, Dipartimento Energetica - ENEA, RdS /2013/143
- V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos, con il contributo di C. Becchio, E. Fabrizio, M. Filippi, V. Monetti, "Sviluppo della metodologia comparativa cost-optimal secondo Direttiva 2010/31/UE", Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, RdS/2013/144
- A. Poggio, G. Cerino Abdin, A. Crocetta, L. Degiorgis, M. Noussan, R. Roberto, M. Caldera, M. Gualtieri, F. Hugony, "Metodologia per i bilanci energetici territoriali e la pianificazione delle politiche energetiche: uno strumento per la verifica del raggiungimento degli obiettivi strategici nazionali e comunitari", Politecnico di Torino, Dipartimento Energia - ENEA, RdS/2013/145
- S. Carlucci, L. Pagliano, "Definizione dei parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del rapporto costi/benefici", Politecnico di Milano, Dipartimento Energia, RdS /2013/146
- G. Fasano, M. Zinzi, C. Romeo, P. Signoretti, D. Iatauro, G. Centi, B. Di Pietra, E. Costanzo, "Sviluppo di metodologie, strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici", ENEA, RdS /2013/147
- G. Riva, R. Nidasio, A. Martino, "Sistema esperto per l'individuazione di interventi di riqualificazione energetica", CTI RdS /2013/148
- M. Cellura, M. Beccali, F. Guarino, V. Lo Brano, "Redesign di edifici a energia netta zero e valutazione del contributo dell'Embodied Energy, per la definizione dell'edificio NZEB. Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana", Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici, RdS/2013/272
- S. Zobot, D. Di Santo, "Guida ai Contratti di Prestazione Energetica negli Edifici Pubblici", FIRE, RdS /2013/150
- M. Filippi, S. P. Corgnati, M. Perino, V. Fabi, "Sviluppo di una metodologia e strumenti per la definizione della valutazione sui consumi energetici dei comportamenti dell'utenza. (IEA-ECBCS Annex 53)", Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, RdS/2013/271
- E. Biele, V. Bini, S. D'Ambrosio, D. Di Santo, G. Tomassetti, V. Venturini, "Indagine conoscitiva sulla diffusione e applicazione del finanziamento tramite terzi (FTT) e dei contratti a prestazione energetica garantita (EPC) negli edifici della Pubblica Amministrazione", FIRE, RdS/2013/273
- S. Ferrari, P. Caputo, "Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici - Analisi dei consumi elettrici del parco edifici del Politecnico di Milano", Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, RdS /2013/151
- F. Furiani, M.G. Landi, M.C. Novelli, "Aspetti normativi del contratto EPC e dei suoi elementi di garanzia per la P.A.", ENEA, RdS /2013/274
- F. Cumo, A.M. Fogheri, S. Agnoli, G. Centi, C. Romeo, "Lay-out di progetto di riqualificazione energetica di un edificio della PA ad uso scuola", Sapienza Università di Roma, CITERA - ENEA, RdS/2013/152
- G. Riva, G. Murano, "Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva", Università Politecnica Marche, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali, RdS/2013/153

- L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro, "Integrazione dell'indice di severità climatica ENEA nella nuova norma UNI 10349-3. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Differenze di temperature cumulate (gradi giorno ed altri indici sintetici)", ENEA, RdS/2013/154
- C. Bibbiani, L. Incrocci, A. Pardossi, "Caratterizzazione di materiali granulari innovativi; analisi dei sistemi di pilotaggio della irrigazione con sensoristica a basso costo", Università di Pisa, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agroambientali, RdS/2013/155
- S. Benvenuti, L. Incrocci, L. Botrini, A. Pardossi, "Ecosistemi come risorsa di germoplasma per un verde pensile urbano ispirato alla sostenibilità. Caratterizzazione fisiologica di specie vegetali spontanee utilizzate per la realizzazione di tetti verdi in ambiente urbano", Università di Pisa, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agroambientali, RdS/2013/275
- T. Poli, A. G. Mainini, R. Paolini, A. Speroni, L. Vercesi, "Sviluppo di materiali e tecnologie per la riduzione degli effetti della radiazione solare. A. Implementazione delle prestazioni e nuovi prodotti per il controllo della radiazione solare e costruzione di un archivio cartaceo di prodotti innovativi", Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito - ENEA, RdS/2013/156
- C.A. Campiotti, R. Di Bonito, G. Giagnacovo, R. Colletta, M. Scoccianti, C. Viola, "Eco-Green Roof & Vertical Greener System. Eco-sistemi vegetali per l'efficienza energetica e il risparmio di energia negli edifici urbani", ENEA, RdS/2012/276
- R. Paolini, T. Poli, M. Zinzi, A. G. Mainini, M.P. Fiori, A. Speroni, L. Vercesi, "Sviluppo di materiali e tecnologie per la riduzione degli effetti della radiazione solare. B. Invecchiamento e sporcamento accelerato di cool materials", Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito - ENEA, RdS/2013/159
- G. Rossi, P. Iacomussi, "Fotometria e goniofotometria di materiali da costruzione opachi", INRIM, RdS/2013/157
- E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco, "Modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo - Linee guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo", Università di Bari, Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali, RdS/2013/160
- M. Zinzi, E. Carnielo, G. Fasano, "Caratterizzazione e valutazione di pavimentazioni riflettenti per applicazioni urbane", ENEA, RdS/2013/166
- A. Disi, S. Del Bufalo, C. Vinci, L. Cifolelli, F. Pacchiano, "Piano integrato di Comunicazione", ENEA, RdS/2013/161
- A. Disi, A. Moreno, F. Pacchiano, "Utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'efficienza energetica", ENEA, RdS/2013/162
- A. Disi, S. Lucibello, "Specifiche tecniche per la realizzazione del Modello offline *Energy City Virtual Lab*", ENEA, RdS/2013/163
- M. Presutto, S. Fumagalli, P. Pistoichini, V. Longoni, "Rapporto sul labelling degli elettrodomestici", ENEA, RdS/2013/164
- B. Baldissera, G. Fasano, L. Cifolelli, "Strumento di supporto al consumatore finale per un utilizzo consapevole e razionale dell'energia (utenze elettriche nelle abitazioni)", ENEA, RdS/2013/165

Progetto C.3

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

- N. Calabrese, F. D'Annibale, P. Rovella, I. Zamboni, R. Lazzarin, M. Noro, "Gli accumuli termici a cambiamento di fase integrati in impianti di solar heating and cooling: prove sperimentali", ENEA - Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica, Energetica e Gestionale - Università di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, RdS/2013/088
- G. Corallo, A. Simonetti, "Gli impianti di solar cooling a servizio di serre agricole: prove sperimentali", ENEA, RdS/2013/089
- N. Calabrese, G. Boccardi, A. Mariani G.P. Vanoli, F. de Rossi, N. Bianco, F. Ascione, R.F. De Masi, I. Di Matteo, S. Grasso, "Logiche di regolazione progettate per impianti di solar heating and cooling ed a pompa di calore", ENEA - Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, RdS/2013/090
- N. Calabrese, G. Zummo, F. Fioravanti, M. Beccali, P. Finocchiaro, V. Lo Brano, G. Ciulla, G. Oliveti, R. Bruno, "Analisi di sensibilità di impianti di climatizzazione innovativi (solar heating and cooling e pompe di calore) ed individuazione dell'effettiva fattibilità economica rispetto a soluzioni di tipo tradizionale", ENEA - Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici - Università della Calabria, Dipartimento di Meccanica, Energetica e Gestionale, RdS/2013/091
- V. Sabatelli, D. Marano, G. Contento, A. Bruno, A. Ebolese, D. Del Col, M. Bortolato, M. Quaggia, A. Padovan, "Sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione per applicazioni a media temperatura", ENEA - Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/092
- C. Copeta, D. Marano, V. Sabatelli, D. Del Col, M. Bortolato, M. Quaggia, A. Padovan, "Potenzialità della co-generazione e tri-generazione per via solare", ENEA - Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/093
- L. Contuzzi, D. Marano, L. Fallucchi, V. Sabatelli, "Caratterizzazione di una stazione di prova indoor per la sperimentazione di collettori solari termici in condizioni controllate", ENEA, RdS/2013/094
- R. Mastrullo, A.W. Mauro, L. Menna, A. Palma, "Progettazione di due banchi prova strumentati per test su componenti di impianti a compressione di vapore con fluidi HFC e HFO", Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/095

- N. Calabrese, G. Zummo, M. Furrer D. Carmignola, "Un roof-top ad anidride carbonica: analisi sperimentale delle prestazioni durante il funzionamento invernale ed estivo", ENEA - Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, RdS/2013/096
- N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno, M. Pieve, G. Boccardi, "Produzione di acqua calda sanitaria (ACS) in modalità istantanea a mezzo di una pompa di calore a CO₂ (R744)", ENEA, RdS/2013/097

Progetto C.4

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

- G. Buja, M. Bertoluzzo, "Studio di fattibilità per un impianto di ricarica contactless", Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/182
- A. Genovese, F. Vellucci, "Realizzazione di un caricabatteria reversibile", ENEA, RdS/2013/267
- A. Genovese, F. Vellucci, "Sperimentazione di un caricabatteria reversibile", ENEA, RdS/2013/268
- E. Fiorucci, A. Ometto, "Studio teorico-sperimentale di convertitori DC/DC per la ricarica rapida", Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/2013/134
- A. Genovese, B. Di Pietra, D. Sbordone, "Realizzazione e sperimentazione di una stazione di ricarica rapida in c.c. nel C.R. Casaccia", ENEA - Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica,, RdS/2013/135
- G. Giuli, M. Mancini, M. Valentini, "Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani", ENEA, RdS/2013/133
- G. Fusco, A. Alessandrini, C. Colombaroni, F. Giubilei, "Scenari di elettrificazione della rete di trasporto pubblico a Roma. Il fabbisogno energetico", Sapienza Università di Roma, Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica, RdS/2013/131
- G. Fusco, A. Alessandrini, A. Campagna, C. Colombaroni, F. Giubilei, G. Iazeolla, B. Kocoglu, "Scenari di elettrificazione della distribuzione urbana delle merci a Roma. Il fabbisogno energetico", Sapienza Università di Roma, Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica, RdS/2013/132
- F. Cognini, G. Barbieri, M. Moncada, U. De Angelis, G. De Santis, "Ottimizzazione dei parametri di compattazione ed estrusione di precursori originali per schiume di alluminio", ENEA, RdS/2013/098
- R. Montanari, M.E. Tata, P. Plini, "Sistemi di produzione di componenti compositi metallo schiume e di precursori per pannelli AFS", Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/2013/099
- G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, A. Tati, "Tecniche di saldatura ad elevata efficienza per il settore ferroviario", ENEA, RdS/2013/100

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all'indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico

The screenshot shows the ENEA website interface. At the top, there is a navigation bar with links like 'Chi siamo', 'Dove siamo', 'CUG', 'Amministrazione Trasparente', 'Contatti', 'PEC', 'Mappa del sito', 'Siti tematici', 'Links', and 'IntraEnea'. Below this is the ENEA logo and a search bar. A main navigation menu includes 'Ricerca & Sviluppo', 'Servizi', 'Laboratori & Impianti', 'Attività Internazionali', 'Produzione scientifica', 'Lavoro & Studio', and 'Enea Informa'. The main content area features a large image of power lines with the text 'RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO'. Below the image, there is a breadcrumb trail: 'Tu sei qui: Home / Ricerca & Sviluppo / Ricerca Sistema Elettrico'. The main heading is 'Ricerca di Sistema Elettrico' followed by 'Accordo di Programma ENEA-MSE 2012-14'. The text describes the program's goals: to reduce electricity costs, improve system reliability, and reduce environmental impact. It also mentions funding from the Ministry of Economic Development and the Ministry of the Environment. A sidebar on the right lists various research topics such as 'Accumulo di energia elettrica', 'Biomasse', 'Climatizzazione con fonti rinnovabili', 'Combustibili fossili e CCS', 'Efficienza nell'elettromobilità', 'Efficienza per gli immobili della PA', 'Efficienza per industria, Servizi e Civile', 'Energia dal mare', 'Fotovoltaico', 'Nucleare da fissione', 'Nucleare da fusione', 'Solare termodinamico', 'Pubblicazioni', 'Partner', and 'Link utili'. At the bottom right, there is a logo for 'RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO' and 'Accordi di Programma 2006-08 e 2009-2011'.

Abbreviazioni ed acronimi

AC	Alternating current
ACS	Acqua calda sanitaria
AdP	Accordo di Programma
ADS	Accelerator Driven System
AFM	Microscopia a forza atomica
AFRODITE	Advanced Fast Reactor Oriented to the Demonstration of the Innovative lead Technology
AFS	Foam aluminium sandwich
AGATUR	Advanced GAs TURbine Rising
A-IPL	Assisted-Ion Projection Lithography
AIT	Aluminium Induced Texture
ALFRED	Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator
AMP	2-ammino-2-metil-propanolo
AOD	Argon Oxygen Decarburisator
APC	Air Pollution Control
a-Si:H	Silicio amorfo idrogenato
ASTRID	Advanced Sodium Test Reactor for Industrial Demostration
AZO	Ossido di zinco drogato con alluminio
B	Campo magnetico
BA	Broader Approach
BCPs	Copolimeri a blocchi
BEMS	Building Energy Management Systems
BEV	Battery Electric Vehicle
BIPV	Building-integrated fotovoltaic
BMS	Battery Management System,
BOF	Basic Oxygen Furnace
BP	Blackplate
BT	Bassa tensione
c.a.	Corrente alternata
c.c.	Corrente continua
C.R.	Centro Ricerche
CAES	Compressed Air Energy Storage
CAP	Common Alerting Protocol
CC	Corrente costante
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CdC	Capacità di carico
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEM	Clean Energy Ministerial
CFD	Computational Fluid Dynamics
CGE	Cold Gas Efficiency
CHP	Combined Heat and Power
CIRCE	CIRcolazione Eutettico
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
CIS	Rame (Cu)- Indio (In)-Selenio (Se)
CMC	Carbossimetil cellulosa
CNMCA	Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
COEEO	COMfortable, EFFicient Experiential Lighting for Office
COP	Coefficient Of Performance
CPC	Compound Parabolic Concentrator
cpsi	Celle per pollice quadrato
CPVT	Sistema fotovoltaico-termico a concentrazione (Concentrating Photovoltaic Thermal system)
CRESCO	Centro computazionale di RicErca sui Sistemi COmplessi
c-Si	Silicio cristallino
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Forum
CSP	Concetrating Solar Power (impianti solari a concentrazione)
CTI	Comitato Termotecnico Italiano

CTL	Coal to Liquid
CV	Potenziale costante
CVD	Chemical Vapour Deposition
CVI	Chemical Vacuum Infiltration
CZTS	Cu_2ZnSnS_4
DA	Digestione anaerobica
DC	Direct current
DEA	2,2'-dietanolimina
DGGE	Denaturing Gradient Gel Electrophoresis
DHR	Decay Heat Removal
DLgs	Decreto legge
DNI	Direct normal irradiation
DoE	Department of Energy
DP	Doppio pancake
dpa	Displacement per atom
DPB	Discounted PayBack
DSA	Direct Statistical Approach
DSC	Calorimetria differenziale a scansione
DVI	Direct Vessel Injection
EA	Efficienza di assorbimento
EAF	Forno ad arco elettrico
EBT	Emergency Boration Tank
ECMWF	Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine
EDS	Electron Diffraction Spectroscopy
EELS	Spettroscopia di perdita di energia di elettroni
EER	Energy Efficiency Ratio
EERA	European Energy Research Alliance
EHRS	Emergency Heat Removal System
ELTL	EVEDA Lithium Test Loop
EMW	ElectroMagnetic Wave
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia, e lo sviluppo economico sostenibile
EP	Indice di prestazione energetica
EQE	Efficienza quantica esterna
ERANOS	European Reactor ANalysis Optimized System
ESCo	Energy Saving Company
ESNII	European Sustainable Nuclear Industrial Initiative
ETSON	European TSO Network
EURATOM	European Atomic Energy Community
EVEDA	Engineering Validation and Engineering Design Activities
F4E	Fusion for Energy
FA	Fuel Assembly
FAST	Fusion Advanced Study Torus
FBR	Fast Breeder Reactor
FDS	Fast disconnecting system
FEM	Metodo elementi finiti
FESR	Fuel Energy Saving Ratio
FF	Fill factor
FGR	Fission Gas Release
FIB	Focused Ion Beam
FISH	Fluorescence In Situ Hybridization
FORSU	Frazione organica del rifiuto solido urbano
FOS	Acidi organici volatili
FR	Fast reactor
FSW	Friction Stir Welding
FT	Fischer-Tropsch
FT-IR	Spettroscopia IR in trasformata di Fourier
FTT	Finanziamento tramite terzi
FV	Fotovoltaico
GD	Generazione distribuita
GESSYCA	Generatore Sperimentale di Syngas da Carbone
GFA	Macchina frigorifera ad assorbimento
GFC	Macchina frigorifera a compressione
GHSV	Gas hourly space velocity
GIF	Generation IV International Forum
GIS	Geographic Information System

GO	Graphene oxide
GTP	Generalized Perturbation Theory
GUINEVERE	Generation of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor
GWP	Global warming potential
HEMERA	Highly Evolutionary Methods for Extensive Reactor Analysis
HERO	Heavy liquid metal-pressurized water cooled tube
HFC	Hydrofluorocarburi
HLW	High Level Waste
HM	Home made
HRT	Tempo di ritenzione idraulica
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBAD	Ion Beam Assisted deposition
IBS	Ion Beam Sputtering
ICE	Integral Circulation Experiments
IDPSA	Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis
IEA	International Energy Agency
IFERC	International Fusion Energy Research Center
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
IGCC	Integrated Gasification Combined cycle
IGD-TP	TP Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform
IP	Indice di profitto
IPL	Ion Projection Lithography
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISO	International Organization for Standardization
ISWEC	Inertial Sea Wave Energy Converter
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
ITO	Indium Tin Oxide
IVM	Immersed Volume Method
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JT-60SA	JAEA Tokamak 60 Super Advanced
JU FCH	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
LBE	Eutettico piombo-bismuto
LEADER	Lead European Advanced Demonstrator Reactor
LEB	Local Energy Balance
LED	Light emitting diode
LENI	Lighting Energy Numeric Indicator
LES	Large Eddy Simulation
LFR	Lead Fast Reactor
LIFUS	Lithium FUSion
LOCA	Loss of coolant accident (Incidente di perdita di refrigerante)
LOOP	Loss of offsite power
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
LPS	Risonanze plasmodiche localizzate
LTS	Low Temperature Superconductor
LWR	Light water reactor (reattori ad acqua leggera)
MA	Attinidi minori
MBE	Molecular beam epitaxy
MBS	Module Bypass Switch
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MD	Dinamica molecolare
ME	Macchina elettrica
MEA	Monoetanolammina (C ₂ H ₇ NO)
MHYRRA	Multi-purpose HYbrid Research Reactor
MICOS	Multipurpose Installation for COmbustion Studies
MIG/MAG	Metal Inert/Active Gas
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MOX	Combustibile ad ossidi misti
MSE	Ministero dello Sviluppo Economico
MT	Media tensione
NACIE	Natural Circulation Experiment
NEA	Nuclear Energy Agency
NEZB	Nearly Energy Zero Building

NFC	Nuclear Fuel Cycle
Ni-MH	Nichel - Idruro metallico
NIS	Network Intelligence System
NM2P	N-metil-2-pirrolidone
NNSA	National Nuclear Security Administration
NORC	Non Organic Rankine Cycle
NPP	Nuclear Power Plant
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NSS	Nuclear Security Summit
NTO	Nanotubi di ossido di titanio
ODC	Optical Diagnostic of Combustion
ODESSE	Optimal design for smart energy
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLED	Organic light emitting diode
ORC	Organic Rankine Cycle
OWC	Oscillating Water Column
PA	Pubblica Amministrazione
PAA	Acido poliacrilico
PAEE	Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Phase Change Materials (materiali a cambiamento di fase)
PCR	Polymerase chain reaction
PCS	Prova Componenti Solari
PdC	Pompa di calore
PEEK	Polietereterchetone
PES	Primary Energy Saving
PF	Campo poloidale
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PHWR	Pressurized heavy water reactor
PLD	Pulsed Laser Deposition
PR	Resistenza alla proliferazione
PRA	Probabilistic risk analysis
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PUN	Prezzo Unico Nazionale
PUREX	Plutonium-Uranium Extraction
PVD	Physical vapor depositio
PVdF	Polivinilenfluoruro
PWM	Pulse Width Modulation
PWR	Pressurized Water Reactors (reattore ad acqua pressurizzata)
QCP	Piano controllo qualità
QSSPC	Quasi Steady State Photo Conductance decay
RdS	Ricerca di Sistema
Re	Numero di Reynolds
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
REWEC	Resonant Wave Energy Converter
RGO	Reduced graphene oxide (ossido di grafene ridotto)
RM	Resistivity meter
RMS	Root-Mean Square Roughness (rugosità quadratica media)
RPP	Rendimento di primo principio
RSE	Ricerca di Sistema Energetico
SBO	Station Black-out
SBR	Styrene-Butadiene Rubber
sccm	Standard cubic centimeters per minute
SCK · CEN	Studiecentrumvoor Kernenergie Centre d'Études de l'Énergie Nucléaire
SCWG	Gassificazione con acqua in condizioni supercritiche
SEAS	Software Energetico per Audit Semplificati
SEI	Solid electrolyte interphase
SEM	Scanning electron microscopy
SESMR	Sorption Enhanced Steam Methane Reforming
Set-Plan	Strategic Energy Technology Plan
SF	Snow flake
SG	Steam generator (Generatore di vapore, GV)
SH&C	Solar Heating and Cooling
SiNW	Nanowires di silicio (nanofili di silicio)

SM	Smart material
SMES	Superconducting magnetic energy storage
SMR	Steam Methane Reforming
SMR	Small Modular Reactor
SN	Singolo nullo
SNETP	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
SNG	Gas naturale sintetico
SNU	Switching Network Unit
SOC	Stato di carica
SPB	Simple PayBack
s.s.	Sostanza secca
SSE	Sottostazione elettrica
STEESC	Sistemi di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto
SV	Solidi volatili
SW	Software
SWAM	Simulating WAVes Nearshore
TA	Target assembly
TAC	Capacità di tamponamento alcalina
TAT	Triazatruxeni
TCO	Ossido conduttivo trasparente
TCV	Trapped vortex combustor
TES	Thermal Energy Storage
TF	Campo toroidale
TGA	Analisi termogravimetrica
THD	Distorsione armonica totale
TIG	Tungsten Inert Gas
TIR	Tasso interno di rendimento
TLM	Transfer Length Method
TMM	Transfer Matrix Method
TOC	Carbonio organico totale
t-o-c	Time on Steam
TPES	Trigeneration Primary Energy Ratio
TPL	Trasporto Pubblico Locale
TRA	Tempo di recupero attualizzato
TRIM	Transport of ions in matter
TRY	Test Reference Year
TVC	Trapped Vortex Burner
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
USC	Ultra-SuperCritical
US-NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
UTA	Unità di trattamento aria
VAL.CH.I.RI.A	VALorizzazione CHar, Impianto Ricerche Avanzate
VAN	Valore attuale netto
VAV	Variable Air Volume
VE	Veicolo elettrico
VLS	Vapor-Liquid-Solid
WAM	WAve prediction Model
WGS	Water Gas Shift
WP	Winding pack (pacco di avvolgimento)
X-EDS	X- Energy dispersion spectroscopy
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-Ray diffraction
YBCO	Ittrio Bario Rame Ossigeno

Edito dall'ENEA
Servizio Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it

Copertina: Cristina Lanari

Febbraio 2014