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 secondo anno di attività



Gennaio 2015

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
Risultati del secondo 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

2015 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-314-2

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 secondo 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

Gennaio 2015

Un sentito ringraziamento ai colleghi dell'Unità di Progetto "Ricerca di Sistema Elettrico"
Rocco Ascione, Vincenzo Gerardi, Agostino Iacobazzi, Marcello Petitta, Rosa Provaroni
per il loro contributo alla pubblicazione del volume

Indice

Presentazione 7

GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Sistemi avanzati di accumulo di energia 9
Responsabile scientifico: Mario Conte

PRODUZIONE DI ENERGIA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili 83
Responsabile scientifico: Vito Pignatelli

Energia elettrica da fonte solare: Ricerca su celle fotovoltaiche innovative 135
Responsabile scientifico: Paola Delli Veneri

Energia elettrica da fonte solare: Solare termodinamico 173
Responsabile scientifico: Domenico Mazzei

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso 217
Responsabile scientifico: Gianmaria Sannino

Cattura e sequestro della CO_2 prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili 239
Responsabile scientifico: Stefano Giammartini

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV generazione 299
Responsabile scientifico: Felice De Rosa, Mariano Tarantino

Attività di fisica della fusione fomplementari a ITER 345
Responsabile scientifico: Aldo Pizzuto

RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi 381
Responsabile scientifico: Ilaria Bertini

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico 457
Responsabile scientifico: Gaetano Fasano

Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione 499
Responsabile scientifico: Nicolandrea Calabrese

Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità 559
Responsabile scientifico: Antonino Genovese

Elenco documenti tecnici 585

Abbreviazioni ed acronimi 599

Presentazione

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

La Ricerca di Sistema Elettrico comprende sia temi di ricerca fondamentale che studi di carattere sistemico e prenormativo. Le attività di ricerca sono orientate alla promozione di un sistema energetico più sicuro ed efficiente, che consenta il contenimento dei prezzi dell'energia elettrica per i consumatori e le imprese attraverso lo sviluppo tecnologie sempre più innovative, efficienti e competitive, che migliorino la qualità del servizio e diminuiscano i costi e l'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 2013 ENEA, ha attivato 12 progetti, all'interno delle tre aree di ricerca previste dal Piano Triennale 2012-14 sulla Ricerca di Sistema Elettrico:

- Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico
- Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
- Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Sono state portate avanti attività finalizzate all'accumulo di energia elettrica (batterie al litio, redox a flusso) essenziali per la diffusione delle fonti rinnovabili caratterizzate da forte discontinuità temporale. Nel settore specifico della produzione di energie rinnovabili, sono proseguite le ricerche: 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 sia attraverso lo sviluppo di sistemi ad elevato rendimento basati sulla tecnologia della gassificazione), di componenti e impianti prototipali per la produzione di energia da correnti marine, di sistemi basati sulla tecnologia del solare termodinamico e di tecnologie innovative per il fotovoltaico avanzato (film sottili innovativi, celle organiche).

Sono proseguite inoltre le attività sul nuovo nucleare da fissione: studi di sicurezza sugli impianti nucleari, svolte principalmente in un contesto internazionale, e nucleare di IV Generazione (tecnologia dei reattori veloci refrigerati a piombo). Relativamente al nucleare da fusione, per rispettare gli impegni assunti dal Governo italiano a livello internazionale, procedono le attività di fisica e sviluppo componenti prototipali avanzati a supporto del programma ITER per la realizzazione di una macchina Tokamak da installare in Giappone (Broader Approach).

Nel campo dell'utilizzo sostenibile dei combustibili fossili sono continuate le attività di studio e sperimentazione di tecnologie di cattura e sequestro della CO_2 (CCS), portate avanti nell'ambito del Polo Tecnologico del Sulcis in Sardegna, insieme con la società partecipata Sotacarbo.

Per quanto riguarda il risparmio energetico negli usi finali, sono state svolte ricerche sull'efficienza energetica nei settori dei servizi, industria e civile e della climatizzazione con la realizzazione di prototipi sperimentali. In particolare per la mobilità elettrica sono stati effettuati studi e ricerche su componenti e strutture di alimentazione innovative per la ricarica rapida di veicoli elettrici.

Le attività sono state condotte da circa 500 ricercatori ENEA e coinvolgono 12 Unità Tecniche di 7 centri (Casaccia, Frascati, Trisaia, Bologna, Brasimone, Saluggia, Ispra). Alle attività hanno partecipato inoltre circa 250 ricercatori delle università coinvolte (27 Atenei Universitari, con 44 dipartimenti) e 30 di Sotacarbo e FN.

Nel volume per ognuno dei 12 progetti di ricerca viene riportata una descrizione dell'attività svolta e dei principali risultati raggiunti. Tutta la documentazione tecnica prodotta nell'ambito del PAR 2013, pari a 298 rapporti tecnici, può essere acquisita dal sito web ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico), che consente di accedere anche a tutta la documentazione relativa alle 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.

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 dell'accumulo centralizzato con quello futuro di sistemi di accumulo distribuiti lungo la rete elettrica. 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 - SMES, accumulo dell'idrogeno, accumulo termico ed accumulo elettrochimico) sempre più rispondenti alle necessità specifiche della rete elettrica.

In particolare, nel progetto sono previste attività di ricerca e sviluppo di sistemi di accumulo mirate alle specifiche funzioni richieste dal sistema elettrico nazionale, tenendo nel dovuto conto gli indirizzi, strategie e programmi definiti in ambito europeo.

Il SET Plan (Strategic Energy Technology Plan – la strategia energetica dell'Unione Europea fino al 2050) ha inserito l'accumulo dell'energia elettrica tra le tecnologie strategiche prioritarie per lo sviluppo del sistema elettrico europeo, in linea con gli obiettivi energetici al 2020 e al 2050. L'accumulo di energia ha guadagnato un elevato interesse politico alla luce dello sviluppo delle fonti rinnovabili e della generazione distribuita, e nell'ottica di ridurre le emissioni di anidride carbonica, di migliorare la stabilità della rete e di controllare le fluttuazioni delle risorse variabili.

Per sostenere questa strategia sono state create alleanze tecnologiche (come la European Energy Research Alliance, EERA) e adeguati gli obiettivi e le risorse del nuovo Programma Quadro Horizon 2020, che prevede specifiche attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione in scala reale di varie tecnologie di accumulo all'interno dei Programmi di Lavoro di "Energy" (per le applicazioni nel sistema elettrico), "NMP-Nano materials" (per le ricerca di base sui materiali e sistemi più interessanti, quali quelli avanzati oltre la litio-ione) e "Transport" (più rivolto ad applicazioni per veicoli elettrici ed ibridi). In ambito EERA, è stato avviato uno specifico programma sull'accumulo di energia a cui l'ENEA partecipa attivamente, coordinando il Sottoprogramma "Accumulo Elettrochimico".

Infine la strategia energetica nazionale (SEN) vede nell'accumulo una delle possibili evoluzione tecnologiche e di mercato in grado di sostenere le rilevanti modifiche strutturali del sistema energetico nazionale e raccomanda, tra l'altro: "*La riduzione dei costi ed il miglioramento delle prestazioni della capacità di accumulo elettrico. Le tecnologie di accumulo, insieme allo sviluppo della rete, saranno fondamentali per garantire lo sviluppo in sicurezza delle energie rinnovabili elettriche e delle smart-grid, ma anche per accompagnare la diffusione dei veicoli elettrici. Ad oggi la tecnologia non è ancora matura per un diffuso utilizzo industriale: in tutto il mondo sono installati solo 450 MW di accumuli elettrochimici; tuttavia non c'è dubbio che questa tecnologia si stia sviluppando rapidamente – trainata dal settore automobilistico – e diventerà sempre più competitiva. L'Italia non vuole perdere questa occasione importante di sviluppo industriale, non solo in un'ottica nazionale: se quindi appare prematuro avviare un programma massivo di installazione nei prossimi 2-3 anni, è indispensabile favorire la sperimentazione nella filiera nazionale per acquisire know-how, capire quali tecnologie siano più adatte, quali siano i veri benefici*

per il sistema e distribuire in modo più consapevole la spesa nel tempo in attesa di una maggiore maturità tecnologica e di una riduzione significativa dei costi".

Pertanto l'attenzione delle attività ENEA rimane concentrata, dopo i risultati ottenuti nel primo anno del Piano Triennale, sui sistemi di accumulo più promettenti in termini tecnici ed economici per applicazioni di piccola e media taglia (indicativamente dai kW fino a qualche decina di MW) alla generazione distribuita con elevata presenza delle fonti rinnovabili ed alle smart grid. La prevalenza delle attività di ricerca è quindi data all'accumulo elettrochimico (con sistemi a base di litio e con sistemi redox a flusso ed ad alta temperatura) in quanto le analisi svolte nel precedente periodo hanno chiaramente evidenziato tempi più lunghi di disponibilità per altri sistemi di accumulo, quali quelli metallo-aria o quelli a base di idrogeno.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo generale del progetto 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 2012-14 era prevista la valutazione dello stato di sviluppo e delle prospettive applicative di altri metodi di accumulo innovativi, quali ad esempio l'utilizzo dell'idrogeno e gli SMES. Nella precedente annualità è stata svolta una dettagliata analisi delle effettive potenzialità di utilizzo dell'idrogeno quale sistema di accumulo di energia rinnovabile nelle reti elettriche che ha evidenziato limitate prospettive nel breve e medio termine. Conseguentemente è stato deciso di concentrare le attività su un numero limitato di soluzioni tecnologiche, come previsto nel Piano Triennale della Ricerca di Sistema (RdS), di più prossima applicazione, come i sistemi redox a flusso; analoga decisione è stata presa per i sistemi SMES.

L'obiettivo viene perseguito sempre favorendo un approccio sistemico che, partendo dalla ricerca scientifica e tecnologica sui sistemi più promettenti, possa poi arrivare fino alla sperimentazione di taglie significative di sistemi tecnologicamente ed industrialmente più promettenti per le reali necessità della rete elettrica italiana.

Nella presente annualità sono state estese le attività relative agli aspetti ambientali e di sicurezza, cercando di intervenire e di proporre soluzioni migliorative all'intera filiera: dalla produzione alle fasi di utilizzazione e riciclaggio finale dei vari sistemi di accumulo. Nella fase di ricerca e produzione vengono scelti materiali con ridotto o nullo impatto ambientale; inoltre viene ampliata la verifica sperimentale della possibilità di garantire una "seconda vita applicativa nelle reti" alle batterie usate nei veicoli elettrici, in modo da individuare nuove strade per il contenimento dei costi del sistema di accumulo. Per migliorare l'accettazione e ridurre l'impatto ambientale ed anche economico delle batterie sono stati studiati e sviluppati processi ecocompatibili di recupero dei materiali contenuti nelle batterie di maggiore interesse applicativo.

Le attività del progetto si articolano in quattro obiettivi intermedi, corrispondenti a diverse linee di ricerca, più un obiettivo specifico relativo ad attività di comunicazione e diffusione dei risultati e alla partecipazione a collaborazioni internazionali:

a. Ricerca e sviluppo di batterie al litio per le reti elettriche
b. Ricerca e sviluppo di batterie redox a flusso
c. Analisi sperimentali, di identificazione di cicli rappresentativi e di sicurezza di sistemi di accumulo elettrochimico
d. Recupero di materiali da batterie al litio a fine vita
e. Partecipazione a collaborazioni internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Ricerca e sviluppo di batterie al litio per le reti elettriche

L'obiettivo prevede la prosecuzione delle attività di ricerca per il consolidamento dei risultati più promettenti ottenuti nella precedente annualità, su due percorsi alternativi: 1) il completamento della scelta ed ottimizzazione dei materiali anodici (ossidi di titanio o di silicio) e catodici (litio ferro fosfato e fosfati di manganese) più innovativi e dei relativi processi di fabbricazione, e loro completa caratterizzazione chimica, fisica ed elettrochimica in celle in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni secondo la procedura sviluppata dal Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE. Inoltre viene proseguito, per la verifica delle effettive potenzialità applicative in sistemi di accumulo, lo studio di materiali anodici a base di grafene che, pur aprendo interessanti prospettive di sviluppi

futuri, richiedono ancora attività di ricerca. I materiali scelti sono prodotti in quantità adeguate alla realizzazione e caratterizzazione di decine di campioni di elettrodi e di piccole celle da laboratorio (in versione a tre elettrodi e celle bottone); 2) l'ottimizzazione di componenti elettrodici con i migliori materiali anodici (grafiti e ossidi di titanio) e catodici (a base di litio ferro fosfato) per la progettazione, realizzazione e prova di celle complete in taglia significativa (fino a circa 100 mAh) da sottoporre a caratterizzazione elettrica (capacità, energia e potenza specifica e vita ciclica) ed elettrochimica. I materiali prodotti ed i manufatti elettrodici sono sottoposti a completa caratterizzazione chimica, fisica ed elettrochimica in tutte le fasi del processo fino alla realizzazione delle celle finali. Le celle complete sono di due tipologie: una versione di alta energia e l'altra di alta potenza.

Le attività di ricerca sono state divise in tre subtask:

a1. Studio di nuovi materiali elettrodici a più alte prestazioni e/o più basso costo

a2. Realizzazione e caratterizzazione dei materiali in celle da laboratorio

a3. Realizzazione e caratterizzazione di celle complete di taglia significativa.

Presso le Università di Bologna e Camerino 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 in ENEA sono state svolte sia attività di ricerca sui materiali anodici a base di silicio sia preparazioni di manufatti (elettrodi e celle complete), realizzati anche con materiali forniti dalle università.

a.1 Studio di nuovi materiali elettrodici a più alte prestazioni e/o più basso costo

Per quanto riguarda i materiali catodici sono state portate a termine le attività di ricerca di materiali di nuova generazione a base di fosfato di manganese, eventualmente drogato. Nella precedente annualità l'Università di Bologna aveva sviluppato un materiale a base di litio manganese fosfato contenente basse percentuali di V_2O_3 caratterizzato da un'ottima stabilità alla ciclazione e risposta alle correnti elevate, ma con limitati valori di capacità specifica. Nel periodo di riferimento del presente documento è stata completata l'ottimizzazione di questo materiale, che presenta il vantaggio di potere operare con elettroliti convenzionali, anche in configurazione di cella completa.

Per la ricerca di materiali anodici, presso l'Università di Camerino è proseguito lo studio dei materiali selezionati in precedenza (grafiti e composti metallici ed altre leghe con grafene), questi sono stati prodotti in scala utile (decine di grammi) per la verifica degli effetti dello scale up di produzione su prestazioni e costi e per la realizzazione di celle di scala significativa (centinaia di mAh).

Sono proseguite in parallelo le attività di ricerca di materiali anodici a base di silicio con l'ottimizzazione di tecniche di preparazione innovative di materiali nanostrutturati e con particolare attenzione alla loro deposizione su supporti di diversa natura, da utilizzare in celle a litio. Si è cercato di migliorare la riproducibilità della crescita CVD dei nanofili di Si, con l'obiettivo di controllarne pienamente la densità e il diametro medio. Questo controllo permette di analizzare in dettaglio la risposta elettrochimica nei cicli di carica-scarica e di conseguenza ricavare informazioni su come questi due parametri influenzino la capacità di ricarica e il regime di scarica. A questo riguardo, secondo recenti dati pubblicati in letteratura, nanofili di Si di piccolo diametro (< 65 nm) sembrerebbero più efficienti rispetto a nanofili di dimensioni maggiori. Nel corso dell'annualità sono stati provati diversi metodi di deposizione: deposizione per via chimica mediante l'utilizzo di sospensioni di nanoparticelle di Au con differenti diametri, PVD (Physical Vapour Deposition) con un evaporatore a bombardamento elettronico operante in modalità "wet wire" ed infine PVD con una cella di Knudsen dotata di crogiuolo e termocoppia. Il confronto di questi tre metodi ha permesso di determinare il sistema di deposizione migliore da adottare per la successiva crescita dei nanofili di Si.

Materiali catodici

L'attività dell'Università di Bologna ha avuto come obiettivo lo sviluppo di batterie litio-ione ad alta energia specifica operanti con elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e sali di litio [rapporto RdS/PAR2013/177]. Nella precedente annualità l'Università di Bologna aveva condotto uno studio sul $LiMnPO_4$, materiale a struttura olivinica che deintercala/intercala ioni litio a 4,1 V vs. Li con una capacità teorica di 170 $mAhg^{-1}$. In particolare erano state individuate una sintesi sol-gel di tale materiale, ricoperto di carbone, partendo da precursori solubili e introducendo una piccola percentuale in peso di V_2O_3 per migliorarne le prestazioni elettrochimiche, e una sintesi allo stato solido di $LiMnPO_4$ in presenza di meta vanadato di ammonio. I valori di capacità ottenuti rimanevano però inferiori al valore teorico, principalmente per la bassa conduttività del $LiMnPO_4$. Poiché si è pensato che ci potesse essere ancora un ampio margine di miglioramento delle prestazioni del materiale, sono state ottimizzate le sintesi che in precedenza avevano prodotto i materiali con le migliori

prestazioni, ed attenzione è stata anche rivolta alla formulazione degli elettrodi in modo da avere una percentuale di materiale attivo più elevata. E' stato inoltre analizzato un materiale commerciale il $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ (NEI Corporation) che deintercala/intercala ioni litio a 4,7-4,8 V vs. Li^+/Li con capacità teorica di 146,7 $mAhg^{-1}$.

Sono state prese in esame quattro tipologie di catodi: una a base di $LiMnPO_4 \cdot V_2O_3/C$ e una a base di $LiMnPO_4 \cdot Li_3V_2(PO_4)_3/C$, cercando di ottimizzare le condizioni di sintesi e di preparazione degli elettrodi rispetto a quelle della scorsa annualità, una a base di $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$, ottenuto per sintesi sol-gel, e una a base di $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale (NEI Corp.), cercando di ottimizzare la composizione degli elettrodi. Per le prime due tipologie di catodi sono state condotte diverse sintesi, sia sol-gel (sintesi IA) che allo stato solido (sintesi SSI e SSII) allo scopo di individuare una metodologia semplice e facilmente scalabile per una produzione massiva.

I materiali sinterizzati sono stati sottoposti a caratterizzazione strutturale e morfologica mediante spettroscopia di diffrazione di raggi X (XRD), analisi termogravimetrica (TGA), microscopia a scansione elettronica (SEM) abbinata a spettroscopia in emissione di energia (EDS).

Sintesi sol-gel IA di $LiMnPO_4$,$V_2O_{3\ 3\%p/p}/C_{\ 14,3\%p/p}$ (V_2O_3 aggiunto prima della pirolisi)

Tale sintesi, già proposta lo scorso anno (S-I, rapporto RdS/2013/236), aveva prodotto il materiale con le migliori prestazioni elettrochimiche e queste sono state prese come riferimento per la valutazione delle prestazioni dei materiali di nuova sintesi. L'ottimizzazione di questa sintesi consiste nell'aver diminuito la quantità di V_2O_3 al 3% p/p rispetto alla quantità utilizzata in precedenza lo scorso anno (6,25% p/p), portando così ad un aumento del materiale attivo, 70,3% (invece di 68%). I precursori della sintesi erano commerciali e le masse utilizzate (Tabella 1) tenevano conto della purezza dei reagenti. Acetato di Mn(II) e LiOH, entrambi solubili in acqua, erano in rapporto stechiometrico, mentre la quantità in moli di acido citrico era doppia al fine di ottenere una migliore complessazione degli ioni metallici ed un maggior ricoprimento di carbone.

Tabella 1. Precursori della sintesi

Reagenti	PM (g/mol)	Purezza	mmoli	Massa (g)
Mn(II) acetato·$4H_2O$	245,09	≥99,99%	64	15,687
H_3PO_4	98	86,08% in H_2O	64	7,286
LiOH·H_2O	41,96	≥99%	64	2,713
Acido citrico	210,14	≥99,5%	128	27,033
V_2O_3	149,88	99,99%	2	0,301

Per i dettagli sulla procedura di sintesi e di preparazione degli elettrodi e sulle analisi eseguite sui diversi campioni prodotti si rimanda al rapporto completo. La Tabella 2 riporta i codici e i carichi degli elettrodi ottenuti dalle stese della sintesi IA.

Tabella 2. Elettrodi punzonati dalle stese ottenute con il particolato della sintesi IA. Composizione: 85% $LiMnPO_4$, $V_2O_{3\ 3\%}/C_{14,3\%}$, 10% Super C65, 5% RM (attivo $LiMnPO_4$ 70,3%)

Codice Elettrodo	Composito mg	Attivo mg	Composito/cm^2 mg/cm^2	Attivo/cm^2 mg/cm^2
IA_a1	5,78	4,06	9,03	6,34
IA_a3	5,66	3,98	8,84	6,22
IA_a4	6,25	4,39	9,77	6,86
IA_a5	7,79	5,48	12,17	8,56
IA_a6	6,27	4,41	9,80	6,89
IA_a7	6,77	4,76	10,58	7,44
IA_a8	5,46	3,86	8,53	6,00
IA_a9	6,67	4,69	10,42	7,33
IA_a10	4,93	3,47	7,70	5,42
IA_a11	6,28	4,41	9,81	6,89

Sintesi allo stato solido SSI di 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3/C_{4,4\%}$

Il $Li_3V_2(PO_4)_3$ è un materiale con una buona conducibilità elettronica che intercala ioni litio, per questo motivo è anche stato proposto come catodo. Poiché era stato evidenziato che il Mn all'interno della struttura di $Li_3V_2(PO_4)_3$ migliora le prestazioni elettrochimiche, sono stati realizzati catodi compositi costituiti da $LiMnPO_4$ e $Li_3V_2(PO_4)_3$. La

sintesi di 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$/C è stata condotta partendo da precursori commerciali in rapporto stechiometrico; le masse utilizzate dei diversi reagenti sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche dei reagenti per la sintesi di catodi compositi

Reagenti	PM	Purezza	mmoli	Massa (g)
LiH_2PO_4	103,93	≥99,99%	34	3,5463
$MnCO_3$	114,95	≥99,9%	25,5	2,9327
NH_4VO_3	116,98	>99%	5,7	0,6668
glucosio	180,16	ACS		1,004

Rispetto alla sintesi dello scorso anno è stata aumentata la quantità di metavanadato d'ammonio e per non aumentare troppo il contenuto di carbonati si è sostituito $NH_4H_2PO_4$ e Li_2CO_3 con LiH_2PO_4. Si è inoltre condotta la sintesi in presenza di Ar/H_2 per aumentare l'atmosfera riducente.

La Tabella 4 riporta i codici e i carichi degli elettrodi ottenuti dalle stese della sintesi SSI.

Tabella 4. Elettrodi punzonati dalle stese ottenute con il particolato della sintesi SSI. Composizione: 85% 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{4,4\%}$, 10% Super C 65, 5% PVdF (attivo 81,3%)

Codice Elettrodo	Composito mg	Attivo mg	Composito/cm^2 mg/cm^2	Attivo/cm^2 mg/cm^2
SSI_a1	3,39	2,76	5,33	4,33
SSI_a2	4,07	3,31	6,40	5,20
SSI_a3	4,81	3,91	7,56	6,15
SSI_a4	2,69	2,19	4,23	3,44
SSI_a5	3,08	2,50	4,84	3,94
SSI_a6	5,22	4,24	8,20	6,67
SSI_a7	8,00	6,50	12,58	10,23
SSI_a8	5,70	4,63	8,96	7,29
SSI_a9	8,22	6,68	12,92	10,51
SSI_a10	4,26	3,46	6,70	5,45
SSI_a11	6,27	5,10	9,86	8,01
SSI_a12	2,40	1,95	3,77	3,07
SSI_a13	4,10	3,33	6,45	5,24
SSI_b1	4,93	4,01	4,01	6,30
SSI_b2	7,76	6,31	6,31	9,92
SSI_b3	5,37	4,37	4,37	6,86

Sintesi allo stato solido SSII di 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{9,0\%}$

Anche questa sintesi è stata condotta come la precedente partendo dai precursori commerciali in rapporto stechiometrico; le masse utilizzate dei diversi reagenti sono riportate in Tabella 5.

Tabella 5. Caratteristiche dei reagenti per la sintesi di catodi compositi

Reagenti	PM (g/mol)	Purezza	mmoli	Massa (g)
LiH_2PO_4	115,03	≥99,99%	34	3,5448
$MnCO_3$	114,95	≥99,9%	34	2,9327
NH_4VO_3	116,98	>99%	1,7	0,6671
glucosio	180,16	ACS		2,0094

La Tabella 6 riporta i codici e i carichi degli elettrodi ottenuti dalle stese della sintesi SSII.

Tabella 6. Elettrodi punzonati dalle stese ottenute con il particolato della sintesi SSII. Composizione: 92% 0,9 $LiMnPO_4$· 0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{9,0\%}$, 4% Super C65,4% PVdF (attivo 83,7%)

Codice Elettrodo	Composito mg	Attivo mg	Composito/cm^2 mg/cm^2	Attivo/cm^2 mg/cm^2
SSII_a1	3,51	2,94	5,52	4,62
SSII_a2	5,75	4,81	9,04	7,57
SSII_a3	4,84	4,05	7,61	6,37
SSII_a4	5,32	4,45	8,36	7,00
SSII_a5	6,76	5,66	10,63	8,90
SSII_a6	4,76	3,91	7,48	6,15
SSII_a7	3,54	2,96	5,57	4,66
SSII_a8	5,58	4,67	8,77	7,35
SSII_a9	3,31	2,77	5,20	4,35
SSII_a10	5,53	3,79	7,12	5,96
SSII_a11	3,63	3,04	5,71	4,78
SSII_a12	5,17	4,33	8,13	6,80

$LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale (NEI Corporation, USA)

Sono stati inoltre preparati elettrodi utilizzando $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale. La Tabella 7 riporta i codici e i carichi di alcuni elettrodi ottenuti dalle stese prodotte con questo materiale.

Tabella 7. Elettrodi punzonati da alcune stese ottenute con $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$. Composizione: 85% $LiMnPO_4$/$C_{14\%}$, 10% Super C65, 5% pVDF (attivo 85%)

Codice Elettrodo	Composito mg	Attivo mg	Composito/cm^2 mg/cm^2	Attivo/cm^2 mg/cm^2
Ba_1	7,05	5,99	11,08	9,42
Ba_6	6,18	5,25	9,72	8,25
Ba_9	6,48	5,50	10,19	8,66
Be_4	1,92	1,63	3,02	2,56

Caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi preparati con i materiali sintetizzati e con $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$

Con i materiali sinterizzati e con il $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale sono stati preparati elettrodi che sono stati caratterizzati in semicelle contro litio in elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e $LiPF_6$. La caratterizzazione elettrochimica è stata eseguita mediante voltammetrie cicliche, cicli di carica (CC-CV oppure CC) - scarica (CC) a diverse C-rate, fino a 2C, anche a basse temperature per la valutazione della capacità di scarica e della stabilità delle celle a ripetuti cicli.

Sulla base dei risultati ottenuti, tra i materiali sintetizzati sono stati selezionati il $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$/C da sintesi sol-gel e il $LiMnPO_4$·$Li_3V_2(PO_4)_3$ (da sintesi a stato solido SSI). I materiali che hanno dimostrato le migliori prestazioni sono il $LiFe_{0,2}Mn_{0,8}PO_4$/$C_{11\%}$ e il 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{4,4\%}$. Il primo presenta una buona capacità specifica anche alle alte C-rate e una perdita di capacità dello 0,43% a ciclo, valutata su circa 30 cicli galvanostatici a C/3. Il 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{4,4\%}$ ha una capacità più bassa, soprattutto alle alte C-rate, ma una migliore stabilità (da 0,08% a 0,22% a ciclo, valutata su 100 cicli a 50°C e 0,23% a ciclo, su 100 cicli, a 30°C). Il vantaggio di 0,9 $LiMnPO_4$·0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$ /$C_{4,4\%}$ risiede essenzialmente nella semplicità della sintesi, che tuttavia richiede ulteriore ottimizzazione in termini di dimensioni del cristallita.

Il materiale commerciale $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}PO_4$, nonostante la più bassa capacità specifica teorica rispetto ai materiali a base di $LiMnPO_4$ sintetizzati, che tuttavia non raggiungono mai la capacità teorica, è l'unico in grado di dare celle ad elevata energia quando abbinato a elettrodi a base di grafite, di Sn o di Si. Su questo materiale si sta ancora lavorando per ottimizzare la stabilità al ciclaggio.

Si sottolinea che tutti gli elettrodi studiati avevano carichi in grado di fornire sulla base della loro capacità teorica valori di capacità ≥ 1 mAh cm^{-2}, ma i diversi tipi di elettrodo si sono discostati dal valore teorico in modo diverso, mostrando capacità pratiche da 0,5 a 1 mAh cm^{-2}, pertanto la scelta del materiale catodico o dei materiali da abbinare all'anodo selezionato dall'Università di Camerino dipende dal carico di quest'ultimo per realizzare una cella con elettrodi bilanciati.

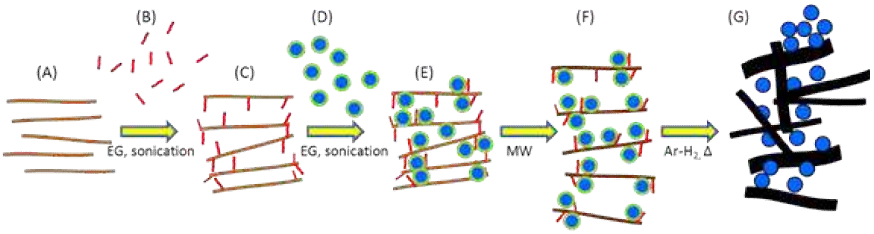
Materiali anodici

L'Università di Camerino ha proseguito lo sviluppo, avviato nelle precedenti annualità, di anodi compositi a base di grafene (RGO, reduced graphene oxide) e Si, SnO_2, leghe Sn-Sb [rapporto RdS/PAR2013/179].

La composizione, la struttura e la morfologia dei materiali attivi sono state studiate mediante analisi termica, spettroscopia IR, diffrazione di raggi X, mentre le caratterizzazioni elettrochimiche sono state effettuate mediante cicli galvanostatici di carica/scarica.

Sintesi e caratterizzazione compositi Si/Grafene (Si/RGO)

I nanocompositi Si/RGO sono stati preparati seguendo la procedura utilizzata nella precedente annualità[1], schematizzata in Figura 1.



(A) Graphene Oxide; (B) low-molecular weight PAA; (C) PAA-GO; (D) oxide-coated Si nanoparticles; (E) Si dispersed in PAA-GO; (F)Si dispersed in partially reduced PAA-GO; (G) Si/RGO nanocomposite powder

Figura 1. Schema riassuntivo della preparazione del composito Si/RGO

La polvere di nanocomposito ottenuta è stata quindi sottoposta a caratterizzazione strutturale tramite IR (Perkin-Elmer® Spectrum 100 FTIR), XRD (Philips® - Geometria θ/2θ Bragg-Brentano - Sorgente Cu, Kα= λ = 1.504 Å), TGA (Perkin-Elmer® STA6000) e a caratterizzazione morfologica tramite microscopia elettronica a scansione (SEM) e trasmissione (TEM).

E' stata approfondita l'analisi del processo di preparazione del nanocomposito, utilizzando la spettroscopia IR e l'analisi termogravimetrica per una migliore comprensione dei singoli step: in Figura 2 sono mostrati gli spettri IR, rispettivamente, della polvere di GO bulk (a), del GO funzionalizzato con acido poliacrilico (b) e del composito Si/RGO (c).

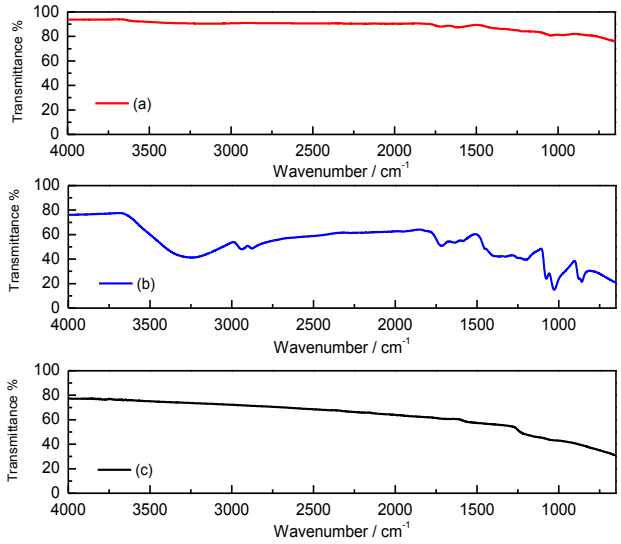


Figura 2. Spettri IR (a) GO Bulk, (b)GO funzionalizzato con PAA, (c) composito Si/RGO

[1] A. Birrozzi, F. Maroni, G. Carbonari, R. Tossici, F. Nobili, R. Marassi, Ricerca di materiali anodici per batterie litio ione operanti in elettroliti organici convenzionali di elevata energia, Report 2013, RdS/2013/237

Nello spettro del GO Bulk (Figura 2a) sono presenti: le bande a 1600 cm^{-1} dovute allo stretching simmetrico dei gruppi C=O e la banda tra 3600 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} dovuta allo stretching dei legami O-H, gruppi funzionali ossidrilici presenti nel GO. Dopo l'aggiunta del PAA (Figura 2b), la funzionalizzazione è evidente dallo shift a numeri d'onda minori e la maggior evidenza della banda a 3200 cm^{-1}, dovuta all'alto numero di gruppi carbossilici sulle catene di PAA, all'apparizione di due piccole bande a 2800 - 2900 cm^{-1} dovute allo stretching simmetrico dei legami C-H alifatici e allo splitting della banda a 1600 cm^{-1} dovuta allo stretching simmetrico dei legami C=O dei gruppi carbonilici. Infine dopo aver aggiunto la polvere di nanoparticelle di Si e avendo sottoposto il nanocomposito ai due step di riduzione, tramite microonde prima e in forno tubulare in atmosfera di Ar/H_2 poi, è possibile osservare la completa riduzione della matrice di GO funzionalizzato dalla mancanza totale di bande associate ai legami C-H, C-OH, C=O tipici dei gruppi funzionali presenti nel GO e nel PAA utilizzato per la funzionalizzazione.

Oltre all'analisi XRD, è stata effettuata un'analisi morfologica e strutturale attraverso microscopia elettronica a scansione e a trasmissione. In Figura 3 sono mostrate le micrografie SEM della polvere (a) e di un elettrodo non ciclato (b).

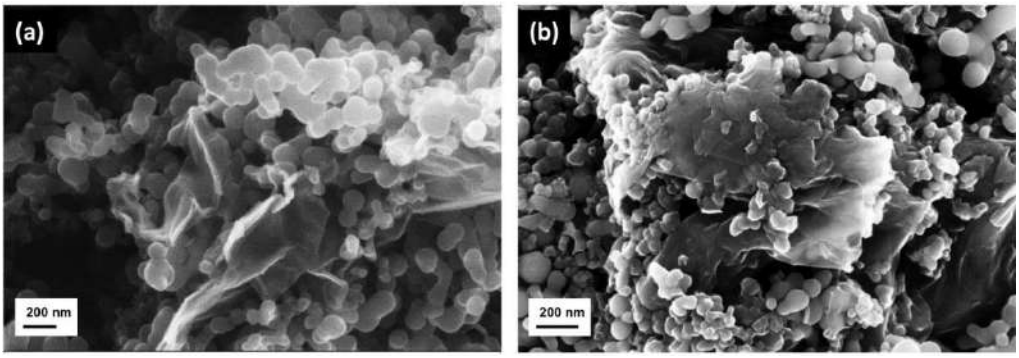


Figura 3. Micrografie SEM - Nanocomposito Si/RGO: (a) polvere (b) elettrodo non ciclato

Dall'analisi morfologica, in Figura 3a si evidenzia come il grafene sia avvolto intorno alle nanoparticelle di Si, di dimensione stimata tra 40 e 120 nm con un possibile restacking dei piani dello stesso grafene limitato dalla funzionalizzazione del GO con PAA a basso peso molecolare avvenuto durante la preparazione del nanocomposito. La micrografia dell'elettrodo non ciclato (Figura 3b) evidenzia una distribuzione piuttosto omogenea delle nanoparticelle di Si, strettamente avvolte dalla matrice carboniosa RGO.

Sintesi e caratterizzazione di compositi SnO_2/Grafene a basso contenuto di SnO_2 (SnO_2/RGO)

La preparazione degli elettrodi è stata ottimizzata intervenendo in vari stadi della preparazione. Nel caso del composito grafene/SnO_2 si è cercato di ridurre il contenuto di Sn fino al 30% circa, in modo da aumentarne la stabilità. A questo scopo, nella sintesi si è aggiunto il precursore di Sn in quantità stechiometrica e si è poi seguita la procedura stabilita in precedenza. Ovviamente, un ridotto contenuto di stagno ha diminuito la capacità specifica, ma in compenso si è raggiunta un'elevata stabilità al ciclaggio.

La sintesi del composito SnO_2/RGO può essere descritta come segue:

- 500 mg di Grafene Ossido (GO) NanoInnova sono dispersi in 50 ml di glicole etilenico (EG) per sonicazione fino alla formazione di una sospensione stabile. La stessa procedura è seguita per preparare una soluzione 1,5 g di acido poliacrilico (PAA) in EG e una soluzione di 343,81 mg $(C_6H_5)_2SnCl_2$ in EG;
- la soluzione di PAA è aggiunta alla soluzione di GO goccia a goccia e lasciata sonicare per due ore;
- la soluzione di $(C_6H_5)_2SnCl_2$ è aggiunta lentamente goccia a goccia alla sospensione di GO/PAA sotto vigorosa agitazione. La miscela risultante è sonicata per due ore;
- la miscela di reazione è posta in un forno a microonde e irradiata con una potenza di 900 W per 15 minuti sotto agitazione;
- il solido nero che si forma è separato dalla soluzione residua per filtrazione, lavato con etanolo per tre volte e seccato in aria a 50 °C;
- il solido è trattato in forno a 800 °C per 2 h in atmosfera $Ar:H_2$ (95:5%) e lasciato raffreddare spontaneamente a temperatura ambiente.

Il composito è stato caratterizzato dal punto di vista chimico-fisico e si è quindi proceduto alla preparazione degli elettrodi. Gli elettrodi prodotti sono stati provati in celle a tre elettrodi, tipo Swagelok®, con elettrodo di riferimento e contro elettrodo costituiti da Li metallico, l´elettrolita utilizzato era una soluzione 1 M di $LiPF_6$ in una

miscela 1:1 (in peso) di etilcarbonato e dimetilcarbonato (LP30 – Merck®) e il separatore un disco di fibra di vetro Whatman GF/D. Sono stati eseguiti cicli galvanostatici a corrente di 500 mA g^{-1}, nell'intervallo di potenziale 0,005 - 2 V vs. Li^+/Li.

Data la percentuale di SnO_2, assumendo la formazione di $Li_{4.4}Sn$, ovvero assumendo che tutto lo Sn reagisca completamente con il Li e che la restante parte carboniosa, formata da grafene e "soft carbon" prodotto dalla combustione del PAA, abbia una capacità pari alla grafite, la capacità specifica teorica del composito è ricavabile dall´equazione:

$$C_{teorica} = C_{Sn} * \%_{massa\ di\ SnO2} + C_{Grafite} * \%_{massa\ di\ CO2} = 991 * 0.1 + 372 * 0.9 = 433\ mAh\ g^{-1}$$

Il valore ottenuto sperimentalmente è in accordo con il valore calcolato (figura 4).

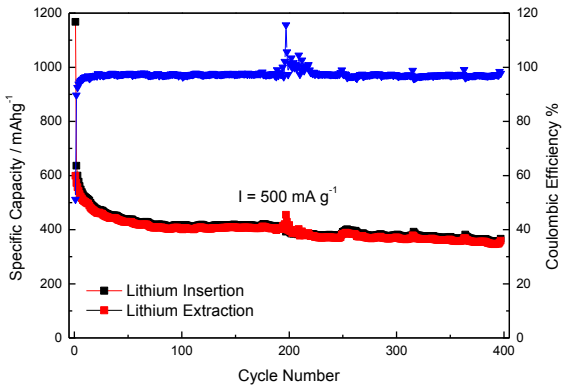


Figura 4 .Capacità *vs.* numero di cicli dell'elettrodo SnO_2/RGO a I = 500 mA g^{-1}

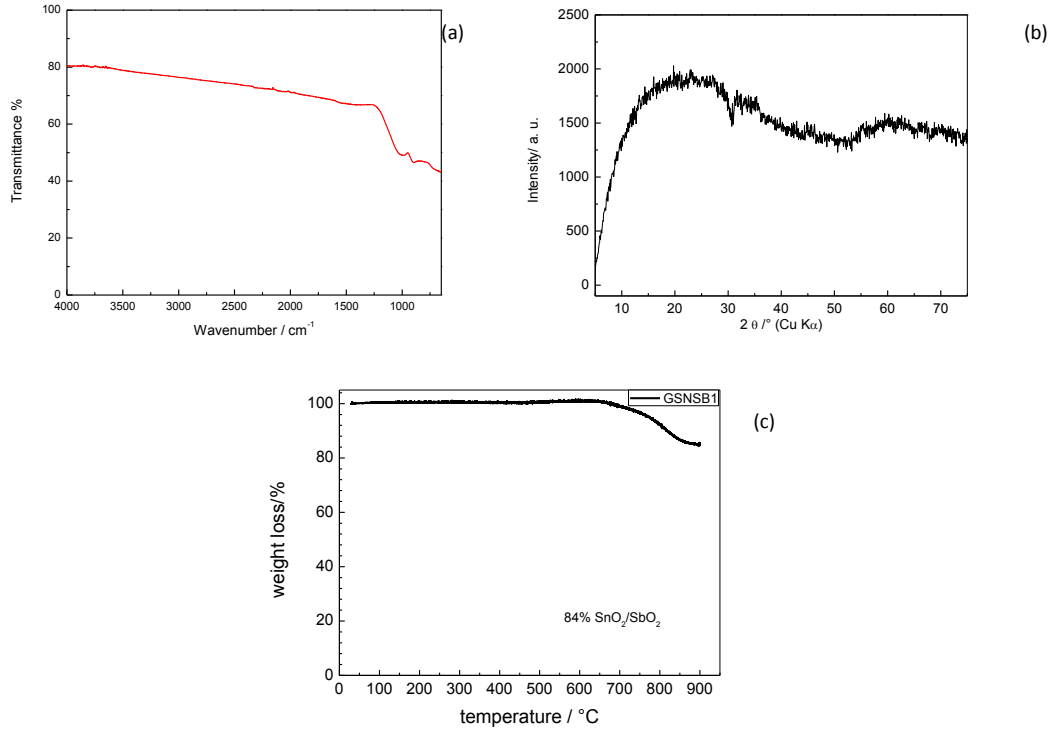
In Figura 4 è presentata l'evoluzione della capacità specifica a 500 mA g^{-1} in funzione del numero di cicli. La capacità specifica calcolata alla prima inserzione di Li è molto alta, circa 1200 mAh g^{-1}. Quest'elevato valore è dovuto a processi irreversibili, quali decomposizione dell´elettrolita, riduzione dello SnO_2 a Sn, e formazione del SEI (Solid Electrolyte Interface). Questi fenomeni causano una perdita di capacità irreversibile del 45%. La perdita di capacità interessa l´elettrodo fino a circa il 50° ciclo, fino al quale la capacità mantenuta è pari al 69% di quella iniziale, cioè durante i primi 50 cicli si ha una ulteriore perdita di capacità del 31%. La capacità assume poi un valore stabile di circa 430 mAh g^{-1}, valore pari a quello teorico, che viene mantenuto fino al ciclo 200. Come si può evincere dal grafico, dopo 200 cicli l´elettrodo mostra segni di instabilità. Probabilmente questo fenomeno non è da ascrivere alla rottura dell´elettrodo, con conseguente perdita di materiale attivo, ma piuttosto alla rottura del SEI e alla sua conseguente riformazione, poiché dopo pochi cicli l´elettrodo riprende a ciclare come in precedenza, mostrando una capacità reversibile di circa 386 mAh g^{-1}, pari al 94% della capacità prima della rottura del SEI.

Sintesi e caratterizzazione di anodi compositi contenenti Sn_xSb_y/Grafene (SnSb/RGO) come materiale attivo

Il composito SnSb/RGO è stato preparato secondo la seguente procedura: 250 mg di GO sono dispersi in circa 100 ml di etilenglicole e sonicati a temperatura ambiente per 2 h in modo da ottenere una dispersione omogenea. Contemporaneamente 1 g di PAA (PM = 2000) viene sciolto in 25 ml di EG sotto agitazione magnetica a 50 °C. La soluzione di PAA viene aggiunta alla dispersione di GO e la miscela sonicata per 3 h. Poi 1,6 g di $(C_6H_5)_2SnCl_2$ e 0,6 g di $SbCl_3$ sono disciolti in 40 ml di EG. La soluzione è aggiunta a quella di GO funzionalizzato e sonicata per 2 h. Si effettua poi il primo step di riduzione con le microonde a 900 W di potenza per 15 minuti. La soluzione è lasciata raffreddare a temperatura ambiente e sono aggiunti 1,6 g di NaH_2PO_2 come agente riducente. La soluzione ottenuta viene sonicata ulteriormente per 1 h e posta nuovamente in forno a microonde per 7 minuti. Il materiale ottenuto viene filtrato sotto vuoto (Isopore Membrane Filter, Millipore, USA), lavato con 80 ml di etanolo e seccato in stufa a 50 °C per 4 h. Il secondo step di riduzione viene effettuato in forno a 800 °C per 2h in atmosfera di Ar:H_2 95:5.

Il composito ottenuto è stato caratterizzato utilizzando spettroscopia IR, diffrazione a raggi X, analisi termogravimetrica ed è stata effettuata l'analisi morfologica della superficie attraverso microscopia elettronica a scansione (Figura 5). Come è possibile osservare dallo spettro IR (Figura 5a), l'assenza di bande dovute a gruppi funzionali testimonia l'avvenuta riduzione della matrice di GO funzionalizzato in RGO; l'analisi del pattern XRD (Figura 5b), mostra la presenza di un segnale largo senza picchi relativi a fasi distinguibili. L'analisi TGA (Figura 5c)

rivela la presenza di un contenuto molto elevato di Sn_xSb_y, superiore all'80%. Dalle micrografie SEM (Figure 5d e 5e) sono distinguibili nanoparticelle dell'ordine di grandezza di decine di nanometri integrate nella matrice carboniosa di RGO.



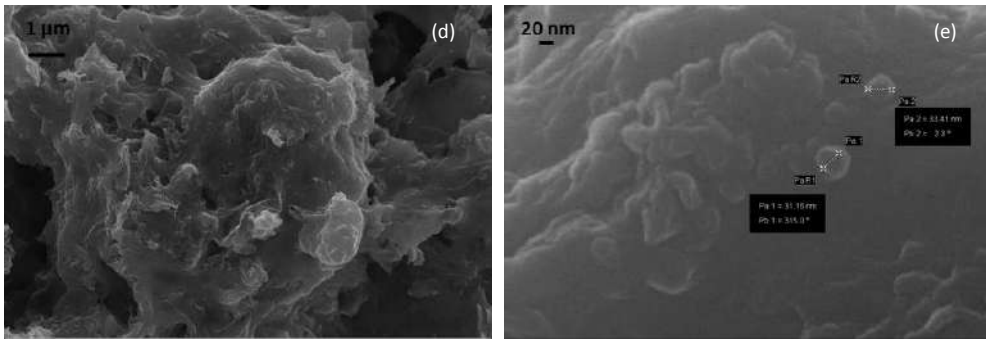


Figura 5. Caratterizzazione strutturale e morfologica del composito SnSb/RGO: (a) FTIR; (b) XRD; (c) TGA; (d,e) SEM

La caratterizzazione elettrochimica è stata effettuata sottoponendo la cella a 100 cicli galvanostatici ad una densità di corrente di 500 mA g^{-1} (Figura 6).

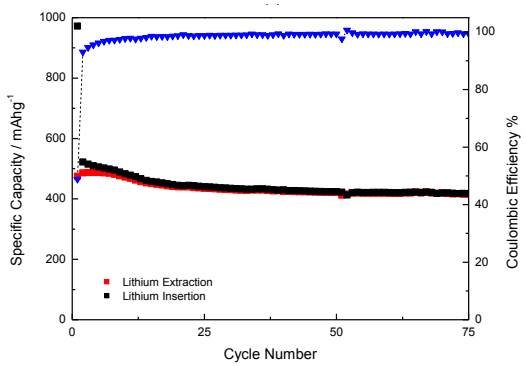


Figura 6. Cella SnSb/RGO: Capacità vs. numero dei cicli a I=500 mA g^{-1}

Come si osserva dai cicli galvanostatici (loading = 0,85 mg/cm^2) riportati in Figura 6, si ha una capacità irreversibile di 490 mAh g^{-1} durante la prima scarica, dovuta principalmente ai processi relativi alla formazione dello strato di passivazione. Successivamente la capacità specifica, da un valore di circa 500 mA g^{-1} si stabilizza rapidamente ad un valore prossimo alle 420 mAh g^{-1} con efficienze superiori al 99%.

Conclusioni
Le ricerche condotte evidenziano alcuni progressi nel campo della ricerca su anodi in lega a base di compositi grafene/metallo:

- per quanto riguarda il materiale composito Si/RGO, rispetto a quanto realizzato in precedenza, si è fatto uso di un elettrolita commerciale, contenente una minore quantità di vinilencarbonato (2% in peso di VC rispetto al 5% dell'elettrolita prodotto in laboratorio). L'utilizzo di un elettrolita preformulato, con un contenuto minore di VC è una strategia che permette potenzialmente di contenere i costi, e allo stesso tempo garantisce capacità superiori e più stabili (al 50° ciclo 1020 mAh g^{-1} in presenza di 2% VC contro 950 mAh g^{-1} in presenza di 5% VC, al 100° ciclo 950 mAh g^{-1} con 2% VC contro 810 mAh g^{-1} con 5% VC);
- è stato possibile ciclare l'elettrodo a correnti più elevate (1 Ag^{-1}), ottenendo capacità reversibili che crescono da un valore iniziale di circa 800 mAh g^{-1} fino a circa 920 mAh g^{-1} dopo 100 cicli. In queste condizioni di corrente si osservano però dei valori anomali di capacità in carica che denotano una certa instabilità dell'elettrodo. Questa instabilità è da attribuirsi all'interfase elettrodo/elettrolita, che si rompe e riforma durante l'ossidazione dell'elettrodo, piuttosto che a problemi di stabilità del materiale attivo. Infatti, non si osservano i picchi della fase cristallina che normalmente portano alla disgregazione dell'elettrodo, e la capacità rimane costante (anzi tende a crescere) confermando che non ci sono perdite di materiale attivo;
- l'utilizzo di un binder PAA a maggior peso molecolare (450000 vs 100000) si traduce in una minore capacità irreversibile (dell'ordine dei 600 mAh g^{-1}) ed una maggiore capacità reversibile inziale (tra 1000 e 1200 mAh g^{-1} nelle due celle analizzate). Questi risultati possono essere attribuiti ad un maggior contenimento delle variazioni di volume a carico dell'alloying Li-Si e ad una stabilizzazione dell'interfaccia. Per quanto riguarda l'efficienza, si osservano invece risultati peggiori, con una perdita di circa il 17% dopo 100 cicli a 1C. Questo risultato indica che probabilmente la struttura del PAA ad altissimo peso molecolare è meno stabile alla ciclazione (probabilmente per fenomeni di degradazione del polimero), portando così a una progressiva perdita di materiale attivo;
- per quanto riguarda l'anodo composito SnO_2/RGO, è stato sintetizzato un materiale composito a contenuto di SnO_2 relativamente basso (SnO_2:C 10:90). Il minore contenuto di SnO_2 si traduce in una capacità reversibile più bassa. Infatti, a I = 500 mA g^{-1}, si ottiene una capacità stabile pari a 400 mAh g^{-1} vs. il valore di 500 mAh g^{-1}. Il basso contenuto di metallo permette però di ottenere una maggiore stabilità, con efficienza prossima al 100% e capacità praticamente costante per 400 cicli;
- per quanto riguarda l'anodo composito SnSb/RGO, la sostituzione del binder polivilidenfluoruro (PVDF) con PAA ha comportato un notevole aumento di stabilità. Infatti, ciclando entrambi gli elettrodi a I = 500 mA g^{-1}, la capacità iniziale è paragonabile e pari a circa 500 mAh g^{-1}. Nel caso dell'elettrodo contenente PVDF, la capacità scende però rapidamente, arrivando a circa 200 mAh g^{-1} dopo 75 cicli, mentre si mantiene stabile a circa 400 mAh g^{-1} nel caso dell'elettrodo contenente binder PAA.

In base ai risultati ottenuti, ulteriori sviluppi della ricerca possono riguardare:

- utilizzo di binder PAA anche per anodi compositi SnO_2/RGO e verifica dell'efficienza;
- ottimizzazione del tipo e del contenuto di binder PAA, e studio di eventuali processi di degradazione a suo carico mediante analisi spettroscopica o cromatografica di elettrolita prelevato da celle ciclate;
- ottimizzazione del contenuto di Si o SnO_2 nei materiali compositi, al fine di trovare il miglior compromesso tra capacità ed efficienza;
- ottimizzazione della sintesi di SnSb/RGO, al fine di valutare l'effetto di una eventuale diminuzione del contenuto di Sn_xSb_y sulla stabilità dell'elettrodo.

Anodi di silicio nanostrutturati

In ENEA è stato intrapreso lo studio della sintesi di materiali sotto forma di strutture nanometriche filiformi di silicio da utilizzare come materiali anodici in batterie litio-ione. Durante la prima annualità del corrente Accordo di Programma è stata dimostrata la crescita di nanofili di silicio per CVD su substrati di acciaio 304 funzionalizzati con ore come catalizzatore depositato con una cella di Knudsen. I risultati ottenuti avevano evidenziato la necessità di

avere un controllo preciso delle dimensioni e della densità del catalizzatore metallico al fine di ottenere nanofili di densità e diametro ottimale per l'uso come materiali anodici in celle litio-ione. Su questo tema si sono quindi concentrate le attività della seconda annualità [rapporto RdS/PAR2013/178].

In alternativa al metodo di funzionalizzazione basato sulla cella di Knudsen, che è in grado di produrre quantità di nanofili adeguate ma con poco controllo su diametro e densità, sono state analizzate due diverse tecniche di deposizione per il catalizzatore metallico Au: nebulizzazione di una sospensione colloidale di nanoparticelle di Au di diverso diametro ed evaporazione PVD (Physical Vapour Deposition) tramite un evaporatore a bombardamento elettronico (e-beam). La motivazione sulla scelta del primo metodo si basa sul fatto che l'uso di una sospensione colloidale permetterebbe in linea di principio la deposizione di nanoparticelle di Au di diametro predeterminato. Nel caso del secondo metodo invece si assume che l'uso di un evaporatore a bombardamento elettronico possa permettere un controllo più preciso del rateo di deposizione di Au rendendo quindi possibile il controllo della dimensione delle nanoparticelle di Au sul substrato. La morfologia dei substrati funzionalizzati è stata studiata mediante microscopia SEM, quindi è stata investigata l'influenza dell'annealing del substrato funzionalizzato sulla morfologia superficiale del sistema Au/acciaio. I substrati funzionalizzati tramite cella di Knudsen, Au colloidale ed Au evaporato tramite e-beam sono stati utilizzati per la crescita di nanofili di silicio e confrontati al fine di determinare i pro e contro di ciascuna metodologia di funzionalizzazione.

Metodi di funzionalizzazione con Au dei substrati di acciaio

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 gassoso disilano. Nel corso dello studio è stato utilizzato come catalizzatore Au che induce la crescita dei nanofili di Si secondo un meccanismo denominato Vapor-Liquid-Solid (VLS). Infatti, utilizzando la tecnica CVD con il substrato mantenuto ad una certa temperatura l'interazione con il gas precursore disilano 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. 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". Questo meccanismo è illustrato in Figura 7.

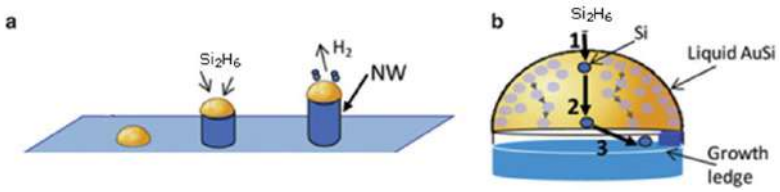
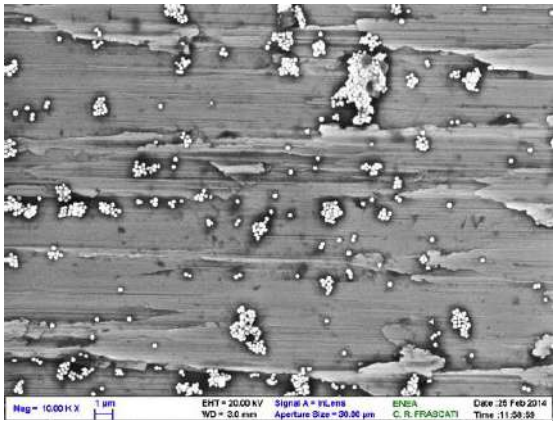


Figura 7. Schema del meccanismo di crescita VLS

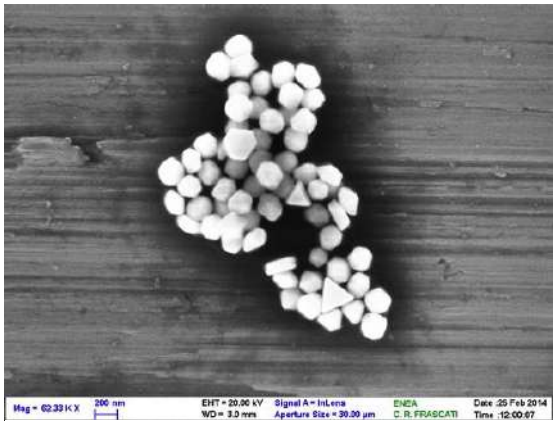
La dimensione nanometrica dei nanofili sul piano si ottiene disponendo in "isole" l'Au sul substrato. Da queste isole parte poi la crescita unidirezionale dei fili che sono limitati nel piano dalle dimensioni dell'isola di partenza. Nel corso della prima annualità, l'Au è stato depositato sul substrato per mezzo di deposizione fisica da fase vapore (PVD) mediante l'utilizzo di una cella di Knudsen. Nel seguito vengono descritte le due metodologie di funzionalizzazione che sono state oggetto di studio nella presente annualità: nebulizzazione di una sospensione colloidale di nanoparticelle di Au di diverso diametro ed evaporazione PVD tramite un evaporatore a bombardamento elettronico.

La prima metodologia, consistente nel dosare gocce di sospensione di particelle di Au (dimensioni 40, 100 e 200 nm) su un substrato di acciaio riscaldato intorno ai 200 °C, permette la formazione di un film di nanoparticelle di Au per mezzo dell'evaporazione del solvente. Questa procedura, a causa del moto centrifugo di dispersione della goccia sul substrato, provoca un accumulo di oro ai bordi della goccia rispetto al centro che si traduce di conseguenza in una deposizione di Au non uniforme. Come esempio, in Figura 8 sono riportate le immagini SEM di un campione di acciaio in cui utilizzando questo metodo è stato depositato dell'Au con diametro di 200 nm (Figura 8a). L'evaporazione del solvente causa l'aggregazione delle nano particelle di Au con la formazione di agglomerati di circa 1 µm (Figura 8b).

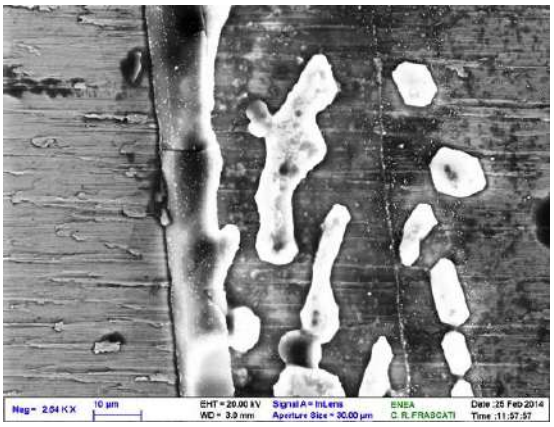
Nelle zone ai bordi della goccia (Figure 8c e 8d) sono evidenti grossi grani di dimensioni >1 µm non attribuiti all'aggregazione delle nanoparticelle di Au.



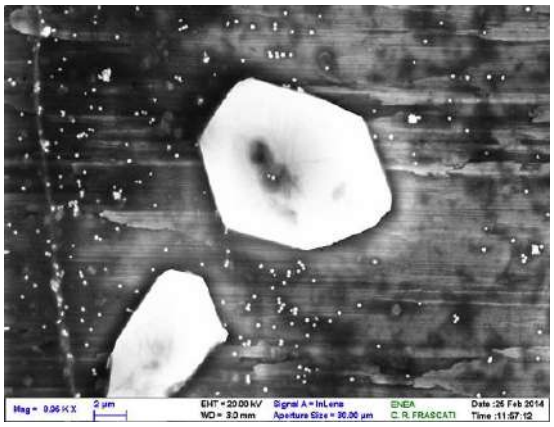
a) Au colloidale depositato su acciaio con il metodo della goccia



b) Esempio di un aggregato di Au colloidale 200 nm formatosi su acciaio con il metodo della goccia



c) Agglomerati dovuti alla presenza di stabilizzatori nella sospensione colloidale



d) Particolare dei sali di Na, Cl e K presenti nella sospensione colloidale

Figura 8. Immagini SEM di un campione di acciaio su cui è stato depositato Au

Per migliorare l'uniformità delle particelle di Au deposte sul substrato, è stato utilizzato un nebulizzatore commerciale di tipo pneumatico per uso medicale. In questo procedimento di deposizione, la dispersione colloidale inserita nell'apposita ampolla viene polverizzata dall'azione di un getto d'aria e depositata sul substrato di acciaio in forma di microgocce. Il loro diametro dipende dalle caratteristiche dell'ampolla e degli ugelli, dalla pressione dell'aria e dall'entità del flusso; nel caso in esame le gocce sono di circa 5 µm.

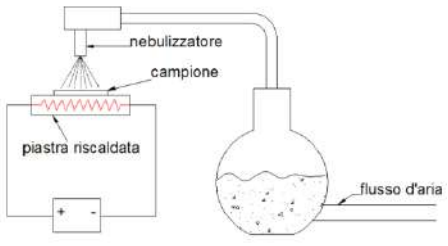


Figura 9. Schema del sistema di nebulizzazione utilizzato per depositare l'Au da sospensione

Il sistema nebulizzatore ("spray nebulizer", Figura 9) utilizzato consiste di un'ampolla contenente la soluzione in quantità minima di 2 ml, di un tubicino per il flusso dell'aria, un doppio ugello con apertura di circa 5 mm. Il substrato di acciaio viene posto su una piastra riscaldante ad una distanza di circa 5 mm dall'uscita dello spray. Durante l'operazione di deposizione la temperatura viene mantenuta costante a circa 150 °C.

Nella seconda metodologia analizzata, per la deposizione è stato utilizzato un evaporatore a bombardamento elettronico di tipo commerciale (TECTRA, Germania, Figura 10), che dispone di una schermatura del crogiolo raffreddata ad acqua e di un movimento lineare che permette di posizionare il crogiolo o altro elemento di

supporto rispetto all'apertura di uscita. L'evaporatore è stato configurato nella versione “wetwire”; in questo caso al posto del crogiolo viene inserita una barretta di W sulla quale viene avvolto un filo di Au.



Figura 10. Evaporatore a bombardamento elettronico

La deposizione PVD mediante evaporatore ha permesso di avere un maggior controllo sullo spessore di Au depositato. Inizialmente è stata determinata l’influenza dei parametri di controllo dell’evaporatore (corrente di filamento, corrente di emissione, HV) sul rateo di deposizione. I cicli di ottimizzazione hanno portato a fissare la corrente di filamento (7,5 A), di emissione (14 mA) e HV (1 kV) in modo da ottenere un rateo di deposizione di circa 0,1 Å/s alla superficie del substrato.

Effetto dell’annealing sui substrati funzionalizzati con Au

La crescita dei nanofili mediante tecnica CVD avviene in genere con i substrati di acciaio funzionalizzati con Au mantenuti a temperature superiori ai 600 °C. Di conseguenza, è necessario investigare gli effetti sulla morfologia e composizione chimica della superficie dovuti all’interazione Au/acciaio a temperature così elevate. Per questo scopo i campioni sono stati caratterizzati mediante immagini SEM prima e dopo l’annealing. In particolare i campioni vengono portati in circa 30 min alla temperatura di 670 °C e riscaldati a questa temperatura per circa 5 min.

Annealing su substrati funzionalizzati con Au in sospensione colloidale

In Figura 11 è illustrato il confronto prima (Figure 11a,c) e dopo l’annealing (Figure 11b,d) per un campione in cui la deposizione dell’oro è avvenuta utilizzando la prima delle due metodologie esaminate.

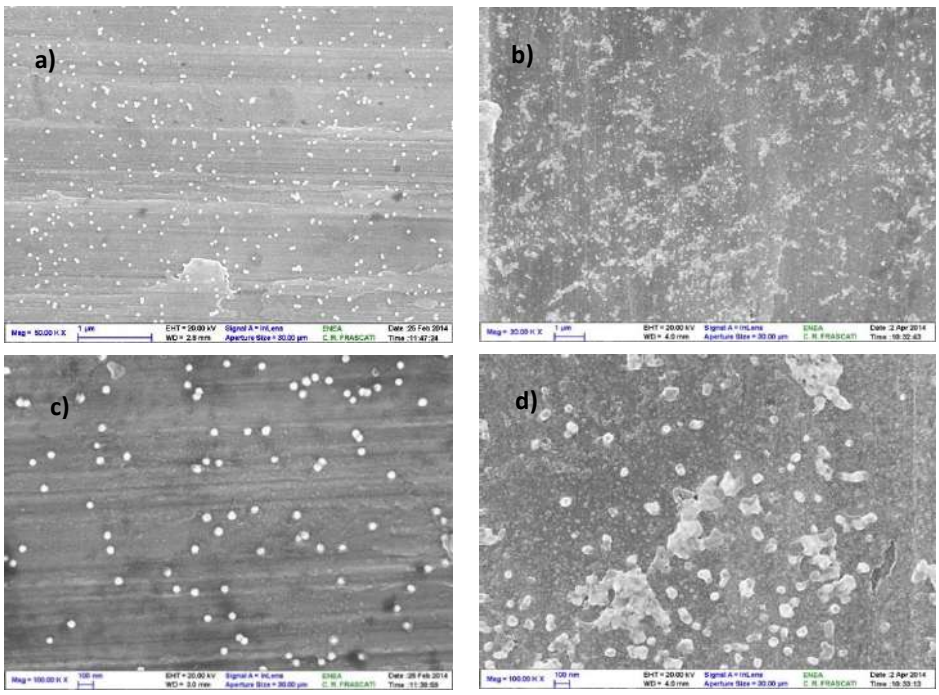


Figura 11. Foto SEM basso ed alto ingrandimento di Au colloidale su acciaio prima (a,c) e dopo (b,d) l’annealing

Le nanoparticelle di 40 nm sono ben distinte insieme a grani di dimensioni di circa 1 µm che sono attribuiti alla presenza di sali di NaCl e KCl provenienti dalle sostanze utilizzate per stabilizzare la sospensione. Le immagini al SEM mostrano che la temperatura di annealing non provoca un incremento del diametro dovuto ad aggregazione delle nanoparticelle che rimangono ben distinte mentre causa la fusione dei sali clorurati.

La presenza di questi sali fusi è mostrata più chiaramente in Figura 11d da macchie più chiare di circa 1 µm. Inoltre si può osservare un cambio nella morfologia della superficie dell'acciaio per effetto della temperatura di annealing (Figure 11b,d). E' noto infatti che l'acciaio austenitico subisce un processo denominato sensibilizzazione ("sensitization") superficiale se esposto a temperature superiori a 400 °C, che produce un impoverimento della resistenza alla corrosione a causa della formazione di carburi (principalmente di cromo) ai bordi di grano.

Annealing su substrati funzionalizzati con Au depositato via PVD

In questo caso campioni sono stati ottenuti per evaporazione di Au mediante e-beam. Le immagini SEM hanno evidenziato per i campioni realizzati, prima dell'annealing, un uniforme deposito di nanoparticelle di Au con diametro <10 nm. La microstruttura formatasi sul supporto di acciaio dopo l'annealing non rende più osservabile l'Au precedentemente depositato. Questo è dovuto alla segregazione superficiale (sensitization) dell'acciaio 304 austenitico che porta alla formazione di specie chimiche, fondamentalmente carburi, che modificano in modo cruciale la morfologia preesistente e coinvolgono il ricoprimento di Au. La differenza di morfologia rispetto ai campioni ottenuti via spray è notevole: sebbene anche l'annealing del campione trattato con lo spray nebulizer comporti una variazione significativa nella morfologia del supporto di acciaio, in quel caso sono ancora chiaramente distinguibili sulla superficie dell'acciaio le nanoparticelle di Au. Nel presente caso invece la superficie finale mostra degli agglomerati irregolari che non riflettono la morfologia iniziale. Questo comportamento ha delle dirette conseguenze sulla crescita mediante deposizione chimica da fase vapore (CVD) di nanofili.

Crescita CVD di nanofili di silicio su substrati funzionalizzati

Per la crescita CVD dei nanofili di silicio si utilizza il disilano come gas precursore. Il substrato è mantenuto in temperatura e nell'interazione con il precursore si provoca una dissociazione della molecola per pirolisi.

Nel caso del disilano, prodotti di dissociazione contenenti atomi di silicio tendono a depositarsi sul substrato dando avvio alla crescita di un film. Per ottenere i nanofili è necessario l'utilizzo di un metallo come catalizzatore, Au nel caso in esame. L'oro, come descritto nei precedenti paragrafi, è stato depositato sul substrato, sia per mezzo deposizione fisica da fase vapore (cella di Knudsen e e-beam) che per mezzo di una dispersione di nanoparticelle di Au con diversi diametri.

Il sistema di deposizione CVD/PVD impiegato è costituito da una camera ad ultra-alto-vuoto (UHV) dotata di un sistema a manifold che controlla l'immissione di 4 differenti gas. La pressione della camera è controllata da una pompa turbomolecolare con cui è possibile raggiungere un vuoto senza bakeout dell'ordine di 1×10^{-6} Pa. La deposizione CVD avviene in regime dinamico con un flusso continuo di precursore in ingresso e camera di crescita a pressione costante. Si utilizzano in genere flussi nell'ordine di qualche decina di cm^3 standard (sccm) e pressioni fino a circa 100 Pa. Il substrato è un supporto riscaldabile di materiale ceramico e viene utilizzato a temperature tra i 400 e 800 °C. Un collegamento diretto della camera di analisi a quella di deposizione permette analisi in-situ dei materiali depositati.

Le procedure di funzionalizzazione del supporto di acciaio con Au mediante sia evaporazione da e-beam sia da spray adottate non prevedono l'annealing del substrato. Quindi si è proceduto depositando l'Au sia prima che dopo l'annealing e successivamente sono stati cresciuti i nanofili di silicio. La crescita dei nanofili è stata effettuata per CVD, utilizzando gas disilano (Si_2H_6) come precursore a pressioni tra 20 e 40 Pa e fissando la temperatura del substrato a 670 ^{0}C.

Crescita CVD con funzionalizzazione tramite cella di Knudsen

I substrati di acciaio dopo essere stati sottoposti ad annealing sono stati funzionalizzati con oro mediante evaporazione con cella di Knudsen. La Figura 12 mostra che nanofili di Si cresciuti mediante questa procedura mostrano una buona densità (g/cm^2) (nel campione della foto è di circa 500 $\mu g/cm^2$ e diametri di dimensioni variabili tra 100 e 400 nm circa). Questa procedura sebbene in grado di produrre quantità di nanofili adeguate permette poco controllo su diametro e densità.

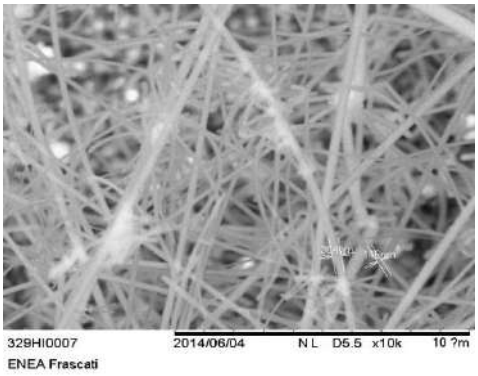


Figura 12. Immagine SEM di un campione in cui l'Au è stato depositato mediante cella di Knudsen. La barra nella foto è lunga 10 µm

Crescita CVD con funzionalizzazione tramite e-beam PVD

La funzionalizzazione con Au deposto per e-beam PVD non favorisce una crescita di nanofili con alta densità. La causa della mancata crescita risiede nelle reazioni superficiali tra i prodotti di segregazione dell'acciaio e l'Au, dovute all'annealing intrinseco a cui è sottoposto il substrato durante la crescita CVD. Si assume che la formazione di carburi conduca ad un inglobamento delle nanoparticelle di Au, favorito anche dalle dimensioni di queste (<10 nm), che porta ad una diminuzione della densità superficiale di catalizzatore disponibile per la reazione di crescita VLS.

La soluzione a questo problema consiste nel sottoporre il substrato di acciaio ad un annealing preliminare fino ad una temperatura superiore a quella di crescita CVD. In questo modo l'Au evaporato con e-beam viene a trovarsi sulla superficie già stabilizzata. I nanofili di silicio a densità elevata(circa 350 µg/cm^2) e diametro uniforme di circa 160 nm.

Crescita CVD con funzionalizzazione con Au colloidale

Diversamente al caso in cui la deposizione dell'Au avviene mediante PVD, la crescita CVD su superfici di acciaio funzionalizzate con Au colloidale risulta aver luogo senza annealing preliminare dell'acciaio. Questo è probabilmente dovuto alle maggiori dimensioni delle nanoparticelle colloidali di Au che non vengono agglomerate nei prodotti di reazione superficiali. In Figura 13 è mostrata un'immagine SEM di nanofili cresciuti su una superficie non pre-riscaldata (annealing) e funzionalizzata con Au colloidale da 40 nm deposto tramite spray. La figura dimostra che il metodo della nebulizzazione permette di ottenere nanofili con una buona densità superficiale (300 µg/cm^2) e che i nanofili sintetizzati hanno un diametro dell'ordine di 300 nm, valore che non rispecchia il diametro nominale delle nanoparticelle originali. Questo è dovuto a effetti di agglomerazione delle particelle originali indotti alla temperatura di crescita CVD.

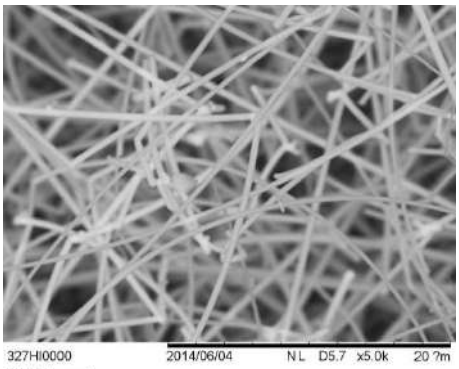


Figura 13. Immagine SEM ottenuta da una superficie funzionalizzata con Au colloidale 40nm senza pre-annealing. La barra nella foto è lunga 20 µm

Conclusioni

Il metodo di funzionalizzazione mediante nebulizzazione da una sospensione di oro colloidale si è rivelato semplice e veloce in quanto non necessita di operazioni in camera a vuoto e il substrato di acciaio non richiede pre-trattamento termico prima della funzionalizzazione. I nanofili prodotti mostrano una buona densità. Tuttavia, il sistema di nebulizzazione deve essere migliorato in modo da permettere una deposizione di nanoparticelle con densità riproducibili e le temperature di crescita CVD rimodulate in modo da ottimizzare i diametri dei nanofili.

L'uso di un evaporatore a bombardamento elettronico per la funzionalizzazione richiede innanzitutto il pre-annealing del substrato di acciaio al fine di evitare la diminuzione di Au superficiale a causa della formazione di carburi dovuta alla segregazione di Cr alla superficie del substrato che si verifica alle temperature di crescita dei nanofili via CVD. Il condizionamento del substrato tramite pre-annealing a temperature poco sopra quella di deposizione è un risultato molto importante per la tecnologia del processo di sintesi dei nanofili di silicio su acciaio. L'uso di un evaporatore e-beam ha dimostrato la potenzialità di una funzionalizzazione con nanoparticelle

di Au di densità e di diametro uniformi. I nanofili prodotti hanno buona densità e diametro costante. Questo studio ha tuttavia evidenziato che risulta necessario un ulteriore lavoro di ottimizzazione dei parametri di deposizione per ottenere nanoparticelle di Au di diametro >10 nm al fine di ridurre gli effetti di impoverimento di Au causati dal trattamento della superficie ad alte temperature. In conclusione, risulta che ambedue le tecniche di funzionalizzazione rappresentano una valida alternativa al sistema con cella di Knudsen utilizzato in precedenza. La sospensione colloidale si caratterizza per la sua semplicità. L'evaporazione con e-beam permette la sintesi completa delle nanostrutture in un sistema controllato e protetto da contaminazioni. Ambedue richiedono ulteriori aggiustamenti per ottenere un'ottimizzazione della morfologia dei nanofili. Data l'importanza dello stadio di funzionalizzazione del substrato nel processo tecnologico di produzione dei materiali nanostrutturati per anodi di batterie litio-ione sarebbe auspicabile nel futuro investigare altre tecniche di deposizione che permettano la deposizione di un film di Au (o altro catalizzatore più economico) in modo semplice, veloce e ripetibile.

a.2 Realizzazione e caratterizzazione dei materiali in celle da laboratorio

Tutti i materiali acquisiti e/o prodotti nel subtask a.1 sono stati caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti elettrodi poi caratterizzati in celle di riferimento da laboratorio (celle a tre elettrodi o celle bottone).

In particolare sono state sviluppate due tipologie di celle litio-ione di ≈1 cm^2 e carico elettrodico tale da assicurare una capacità di ≈ 1 mAh/cm^2 operanti in elettroliti a base di carbonati organici e sali di litio, entrambe con catodo a base di $LiM_xMn_{1-x}PO_4$, e rispettivamente con anodi di grafite e di altro materiale anodico (a base di silicio o di grafene).

Tutte le celle prodotte (alcune decine) sono state sottoposte a cicli di prova per verificarne prestazioni e vita utile, secondo definite procedure di prova (elettrochimiche ed elettriche).

Attività Università di Bologna

L'Università di Bologna [rapporto RdS/PAR2013/180], sulla base dei risultati ottenuti nel subtaska.1, ha selezionato il $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale come catodo da abbinare agli anodi sviluppati dall'Università di Camerino e ad anodi a base di grafite, per lo studio di batterie litio-ione.

All'interno di questo task, è stato affrontato uno dei problemi più critici per lo sviluppo di una batteria litio-ione, ovvero il bilanciamento delle masse elettrodiche, particolarmente cruciale quando si lavora con elettrodi realizzati in scala di laboratorio e con anodi che mostrano elevate capacità irreversibili. Questo, infatti, comporta il dover condizionare gli elettrodi prima dell'assemblaggio di una cella completa, preciclandoli in semicelle *vs.* Li, con lo scopo di prevenire lo sbilanciamento della capacità degli elettrodi con la conseguente perdita di capacità specifica della batteria durante il ciclaggio.

A completamento delle attività della subtask a.1, in una prima fase del lavoro l'Università di Bologna ha proseguito gli studi sulla sintesi dei materiali a base di $LiMnPO_4{\cdot}Li_3V_2(PO_4)_3/C$, cercando di ottimizzare ulteriormente le condizioni di sintesi e di preparazione degli elettrodi, e sulla preparazione degli elettrodi a base di $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ commerciale (NEI Corporation), testando diversi tipi di additivo conduttore e diverse modalità di miscelazione.

Sono state quindi assemblate celle complete con catodi a base di $LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ (LNMO) e anodi di Si/RGO (ricevuti dall'Università di Camerino) o di grafite e queste sono state caratterizzate mediante cicli profondi di carica/scarica galvanostatica a 30 °C. Per dettagli sulle prove eseguite, con i relativi risultati, si rimanda al rapporto completo.

La cella con anodo di Si/RGO e catodo di LNMO/carbone C65 in EC:DMC-$LiPF_6$-F_1EC ha mostrato un calo di capacità dovuto al forte sbilanciamento degli elettrodi durante il ciclaggio. La cella con anodo di grafite e catodo di LNMO/p-RGO, testata a 2C effettiva in EC:DMC-$LiPF_6$, ha evidenziato, invece, risultati soddisfacenti e di grande interesse, sia in termini di energia che di potenza, non solo per applicazioni stazionarie, ma anche per usi nel trasporto (PHEV, plug-in hybrid electric vehicle).

Attività ENEA

L'ENEA ha esaminato quattro materiali innovativi da usarsi come materiali elettrodici per la realizzazione di batterie litio-ione [rapporti RdS/PAR2013/180 e RdS/PAR2013/181]. Con questi materiali sono stati realizzati elettrodi che sono stati caratterizzati in celle da laboratorio. Tutte le celle prodotte sono state sottoposte a cicli di prova per verificarne prestazioni e vita utile tramite ciclazioni galvanostatiche.

In particolare sono state studiate le proprietà di due materiali catodici e due materiali anodici. I materiali catodici, un composito di formula 0,9 $LiMnPO_4$ 0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$/C5,5% ottenuto tramite sintesi allo stato solido ed un

campione commerciale di formula $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$, (prodotto dalla NEI) sono stati forniti dall'Università di Bologna. I materiali anodici sono stati preparati dall'Università di Camerino e presso l'ENEA. Dei due materiali preparati dall'Università di Camerino è stato possibile caratterizzare solo un derivato Si/grafene in quanto il derivato Sn/grafene si è rivelato inattivo.

Il Centro Ricerche ENEA di Frascati ha preparato tre campioni a base di nanofili di silicio con tre tecniche di deposizione differenti: i) deposizione per via chimica mediante l'utilizzo di sospensioni di nanoparticelle di Au, PVD (Physical Vapour Deposition), ii) con un evaporatore a bombardamento elettronico operante in modalità "wet wire" ed infine iii) tramite tecnica PVD con una cella di Knudsen dotata di crogiuolo e termocoppia. I materiali sono stati analizzati da un punto di vista cristallografico tramite diffrazione ai raggi X per valutarne la struttura cristallina. Tutti i materiali hanno mostrato una struttura cristallina ben sviluppata e riconducibile a quelle note in letteratura. Il materiale composito Si/grafene ha inoltre mostrato possedere dimensioni dei cristalliti nanometriche oscillanti tra 26,0 e 55,8 nm, in funzione dell'angolo di diffrazione usato per calcolare la dimensione dei cristalliti.

Con diversi materiali sono stati preparati elettrodi da sottoporre a caratterizzazione elettrochimica. Nel caso dei materiali catodici sono stati preparati sia elettrodi tradizionali utilizzando come legante un polimero fluorurato (teflon), sia elettrodi innovativi con il polivinilacetato come legante.

Il comportamento elettrochimico del materiale composito di formula 0,9 $LiMnPO_4$ 0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$/C5,5% è stato identico, indipendentemente dal tipo di legante usato. Si possono osservare nei profili di tensione due plateau di uguale estensione, localizzati a 3,62 e 3,72 V, ed un terzo, più esteso, localizzato a 4,11 V (figura 14). In entrambi i campioni la capacità specifica registrata durante la prima scarica ammontava in tutto a 25 $mAhg^{-1}$.

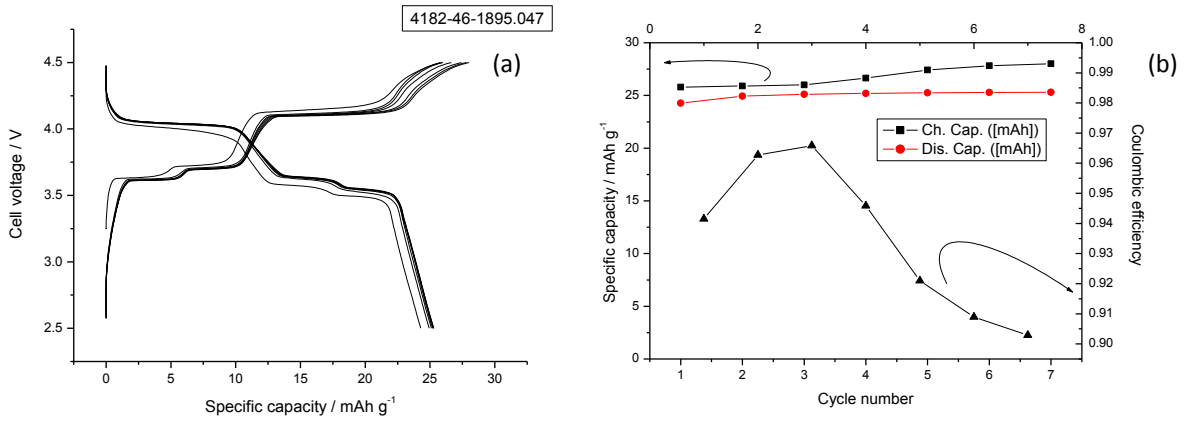


Figura 14. Profili di tensione in funzione della capacità specifica (a sinistra) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (a destra) per un elettrodo a base di 0.9 $LiMnPO_4$ 0.1 $Li_3V_2(PO_4)_3$/C5,5% e PVAc fatto ciclare in una cella al litio metallico a rate di carica/scarica pari a C/10 a 20°C

Nell'elettrodo a base di teflon, al secondo ciclo di carica, si è assistito ad un leggero aumento della capacità specifica che si è portata a 32 mAh g^{-1}. All'aumentare della corrente di scarica si è assistito ad una diminuzione della capacità specifica che raggiunge i 29,82 mAh g^{-1}a C/5 rate, 27,89 mAh g^{-1} a C rate. Raddoppiando questa corrente la capacità scende a 25,9 mAh g^{-1} mentre triplicandola (3C) la capacità si porta a 22,5 mAh g^{-1}. A bassa potenza la cella è stata in grado di erogare circa 120 W per kg di materiale attivo (dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo). La cella era comunque capace di scaricare ancora circa il 60% della sua energia quando scaricata a potenze dell'ordine di 1500 W per kg di materiale attivo (anche questo dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo).

Per valutare l'effetto della temperatura sulla capacità specifica in scarica, una delle batterie è stata fatta ciclare a 40 e 50 °C. Il risultato della prova è riportato in Figura 15. All'aumentare della temperatura di lavoro si assiste ad un progressivo aumento della capacità specifica che si porta dai 31,6 mAh g^{-1} misurata a 20 °C, a 46,6 mAh g^{-1} misurata a 40 °C fino a 54,08 mAh g^{-1} misurata a 50 °C. Quello che è interessante notare è che tale aumento di capacità è tutto concentrato nel plateau a più alta tensione la cui estensione aumenta progressivamente all'aumentare della temperatura. In Figura 15b è riportata la capacità specifica totale (linea più in alto) e la capacità specifica riferita solo al primo plateau (linea più in basso) in funzione della temperatura. E' interessante notare come i punti siano perfettamente allineati e le due curve abbiano la stessa pendenza proprio in virtù del

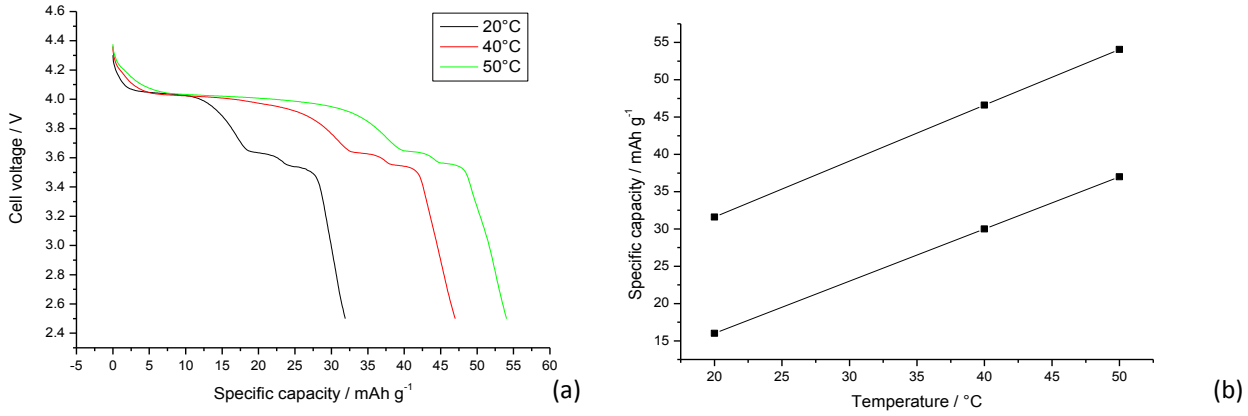


Figura 15. Profili di tensione in funzione della capacità specifica (a) per una cella ciclata a differenti valori di temperatura; (b) plot ottenuto utilizzando i valori di capacità specifica totali (linea in alto) e quelli riferiti solo al primo plateau (linea in basso) riportati in funzione della temperatura di lavoro della cella

fatto che l'aumento di capacità è da ascriversi solo all'aumento del plateau a più alta tensione, essendo la differenza tra le due curve la somma delle estensioni di capacità registrate ai valori di tensione più bassi

Quello che è interessante notare è che tale aumento di capacità è tutto concentrato nel plateau a più alta tensione la cui estensione aumenta progressivamente all'aumentare della temperatura. In Figura 15b è riportata la capacità specifica totale (linea più in alto) e la capacità specifica riferita solo al primo plateau (linea più in basso) in funzione della temperatura. E' interessante notare come i punti siano perfettamente allineati e le due curve abbiano la stessa pendenza proprio in virtù del fatto che l'aumento di capacità è da ascriversi solo all'aumento del plateau a più alta tensione, essendo la differenza tra le due curve la somma delle estensioni di capacità registrate ai valori di tensione più bassi.

Sempre con lo stesso materiale è stata preparata una stesa utilizzando il polivinilacetato come polimero legante. Il campione con il PVAc scaricato a C/10 rate a 50 °C è stato in grado di fornire 57 mAh g^{-1}. All'aumentare della corrente di scarica si assiste ad una diminuzione della capacità specifica che raggiunge i 52 mAh g^{-1} a C/5 rate, 40 mAh g^{-1} a C rate. Raddoppiando questa corrente la capacità scende a 32 mAh g^{-1}mentre triplicandola (3C) la capacità si porta a 28 mAh g^{-1}. Infine al rate di 5C la capacità è di circa 20 mAh g^{-1}. E' stato notato che alla temperatura di 50 °C e a potenziali elevati l'elettrodo risulta abbastanza instabile ed in alcuni cicli la carica è inficiata da una reazione parassita. Ciononostante sono stati effettuati circa 100 cicli di carica e scarica con una buona ritenzione della capacità specifica.

Il comportamento elettrochimico del materiale di formula $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ è stato differente in funzione del tipo di legante usato. Infatti, se a bassa velocità di scarica (C/10) i due elettrodi presentano cicli di carica e scarica simili e la capacità specifica rimane costante durante il perdurare della ciclazione, all'aumentare del rate di scarica, l'elettrodo a base di PVAc ha un comportamento migliore rispetto all'altro. A bassa velocità di scarica, per entrambi gli elettrodi è possibile osservare il plateau di carica localizzato a circa 4,74 V e quello di scarica a 4,64 V. Questo plateau si estende per quasi tutta la capacità del materiale. A fine scarica ed inizio carica si assiste ad un tipico profilo a serpentina che contribuisce solo in minima parte alla capacità totale che raggiunge, a fine scarica, i 133 mAh g^{-1}. All'aumentare della corrente di scarica, nel caso dell'elettrodo a base di teflon, si assiste ad una diminuzione della capacità specifica che raggiunge i 79 mAh g^{-1} a C/5 rate, 70 mAh g^{-1}a C rate. Raddoppiando questa corrente la capacità scende a 60 mAh g^{-1}mentre triplicandola (3C) la capacità si porta a 40 mAh g^{-1}. Al più alto rate di scarica (5C) la capacità specifica è di appena 10 mAh g^{-1}. Progressivamente alla diminuzione della capacità con l'aumentare del rate di scarica si assiste ad una diminuzione della tensione di cella. A bassa potenza la cella è stata in grado di erogare circa 530 Wh per kg di materiale attivo (dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo). All'aumentare del rate di scarica si assiste ad una diminuzione dell'energia specifica. La cella è stata comunque capace di scaricare ancora circa il 28% della sua energia quando scaricata a potenze dell'ordine di 1400 W per kg di materiale attivo (anche questo dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo). Anche nel caso dell'elettrodo a base di PVAc si assiste ad una diminuzione della capacità specifica con l'aumentare del rate di scarica, ma questa è più contenuta. Quando scaricata a C/10 rate l'elettrodo è in grado di fornire 122 $mAhg^{-1}$. All'aumentare della corrente di scarica si assiste ad una diminuzione della capacità specifica che raggiunge i 118 mAh g^{-1}a C/5 e C rate, circa 110 mAh g^{-1}a 2C e 3C rate, mentre a 5C rate l'elettrodo è ancora in grado di liberare 92 mAh g^{-1}. Il fatto che l'elettrodo mantenga una elevata capacità anche per alte correnti di

scarica determina che le energie liberate ad alta potenza di scarica siano più grandi rispetto all'elettrodo che usa come legante il teflon. A bassa potenza la cella è stata in grado di erogare circa 570 Wh per kg di materiale attivo (dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo). Ad alto rate di scarica (5C) la cella è stata in grado di scaricare ancora il 67% dell'energia con potenze dell'ordine di 2700 W per kg di materiale attivo (anche questo dato basato solo sul peso del materiale attivo nel catodo). Entrambi gli elettrodi hanno poi mostrato una buona conservazione della capacità erogata in funzione del numero dei cicli.

I campioni di nanofili di silicio non sono stati ulteriormente caratterizzati da un punto di vista chimico fisico ma sono stati utilizzati direttamente per valutare le loro proprietà elettrochimiche. Il materiale che ha mostrato la capacità specifica più alta è stato quello preparato tramite tecnica PVD, cioè tramite deposizione per via chimica mediante l'utilizzo di sospensioni di nanoparticelle di oro. La capacità specifica di tale materiale si è assestata intorno ai 4000 mAh g^{-1}. Gli altri due campioni, quello preparato con evaporatore a bombardamento elettronico e quello preparato tramite tecnica PVD con una cella di Knudsen si sono comportati in maniera analoga tra loro. La capacità specifica di entrambi i materiali è stata valutata di poco superiore ai 1000 mAh g^{-1}.

Infine per quanto riguarda il materiale composito Si/grafene, questo scaricato a C/15, ha mostrato una capacità specifica al primo ciclo pari a 1200 e 400 mAh g^{-1} ai cicli successivi. All'aumentare del rate di carica si assiste ad una diminuzione della capacità. A correnti pari a C/10 l'elettrodo è capace di liberare circa 260 mAh g^{-1}. Al massimo regime di scarica (5C) la capacità liberata è pari a poco meno di 50 mAh $^{-1}$. In pratica l'elettrodo è capace di fornire il 18% della capacità esibita a C/10 quando caricato ad una corrente specifica pari a 1,5 Ahg^{-1}

Per maggiori informazioni sulle prove eseguite sulle diverse tipologie di materiale e sui risultati ottenuti si rimanda ai rapporti completi disponibili sul sito ENEA.

Prove su celle complete da laboratorio

Sono state sviluppate alcune tipologie di celle complete litio-ione di circa 1 cm^2 a diverso carico elettrodico, operanti in elettroliti a base di carbonati organici e sali di litio, con catodo sia a base di $LiFePO_4$ che $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ e con anodi sia di grafite che a base di silicio/grafene [report RdS/PAR2013/182]. Le celle litio-ione sono state poi sottoposte a caratterizzazione elettrochimica tramite ciclazioni galvanostatiche per verificarne prestazioni e vita utile.

Sono state realizzate delle batterie litio ione con il materiale di formula $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$, con i nanofili di silicio e con il composito Si/grafene. Non è stato possibile realizzare batterie con il materiale composito di formula 0,9 $LiMnPO_4$ 0,1 $Li_3V_2(PO_4)_3$/C5,5% in quanto la capacità esibita era troppo bassa.

Tabella 8. Tipologie di batterie litio-ione esaminate

Cella	Materiale catodico	Materiale anodico
1	$LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$	Grafite HC 25
2	$LiFePO_4$	Nanofili di silicio
3	$LiFePO_4$	Si/RGO

Nel caso del composito Si/grafene, a causa dell'elevata capacità irreversibile esibita dal materiale durante il primo ciclo di scarica, questo è stato preventivamente litiato e de-litiato prima di utilizzarlo come anodo in cella litio-ione. Come anodo da contrapporre al $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ è stato utilizzato un elettrodo a base di grafite commerciale del tipo "High Capacity G25" (HC-G25 della Gelon LIB Group, Shandong, RPC). Come catodo da contrapporre ai nanofili di silicio e al composito Si/grafene è stato utilizzato un elettrodo a base di $LiFePO_4$, anch'esso commerciale (Gelon LIB Group). Sono state quindi realizzate tre tipologie di batterie litio ione: $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$/Grafite HC 25, $LiFePO_4$/nanofili di silicio e $LiFePO_4$/ Si-RGO. Quanto ottenuto nei diversi casi esaminati è sintetizzato nel seguito. Dettagli sulle procedure di preparazione degli elettrodi e sulle singole prove eseguite sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/182.

In conclusione, le prove eseguite su celle complete da laboratorio con i materiali anodici e catodici sviluppati hanno fornito le seguenti principali indicazioni:

- le batterie del tipo $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$/Grafite HC25 avevano una capacità reversibile di circa 1 mAh. Durante il primo ciclo di scarica, la capacità recuperata è stata pari a 0,65 mAh, con un'efficienza coulombica di poco inferiore a 0,6. La capacità è aumentata con il progredire della ciclazione e di pari passo è aumentata l'efficienza coulombica che si è portata ad un valore pari a 0,95 al decimo ciclo. Le batterie sono state sospese dopo 10 cicli e fatte ripartire a C rate e a rate variabile. La batteria ciclata a C rate è stata in grado di caricare reversibilmente circa 1,0 mAh, di cui circa il 45% è stato caricato durante il

processo galvanostatico condotto a C rate. La batteria è stata in grado di scaricare reversibilmente gran parte della capacità caricata. La capacità in funzione del numero dei cicli è sensibilmente diminuita durante i cicli di carica e scarica portandosi ad un valore prossimo a 0,4 al termine dei 300 cicli. La perdita di capacità può essere valutata pari a 0,6 mAh, con una perdita percentuale dello 0,2% per ciclo.

- Delle tre celle preparate con gli elettrodi a base di nanofili di silicio, quella preparata con il materiale Si-329 (ottenuto mediante electron beam) non è stata caratterizzata in quanto è risultata in parziale cortocircuito, condizione che le ha impedito di caricarsi totalmente. La cella preparata con il materiale Si-327 (preparato per nebulizzazione chimica) ha mostrato un andamento anomalo durante il primo ciclo di scarica, ma successivamente si è comportata come atteso. I processi di scarica sono stati tutti simili tra loro per quanto riguarda i profili di tensione ma sono stati differenti per quanto riguarda la capacità che tende a diminuire vistosamente con il progredire del numero dei cicli. La capacità in scarica è aumentata durante i primi tre cicli portandosi fino a 0,8 mA (pari a circa il 67% della capacità stimata). Quindi è lentamente diminuita. Parallelamente diminuisce anche la capacità in carica così che l'efficienza coulombica è risultata aumentare con il progredire del numero dei cicli, portandosi a 0,95 al decimo ciclo. La capacità diminuisce all'aumentare della velocità di scarica ma in maniera contenuta.
- Una delle due batterie litio-ione preparate con l'anodo a base di Si-RGO ha mostrato durante il primo ciclo di carica un disturbo nel valore della tensione che, seppur in maniera non troppo evidente, inizia a oscillare. Questo comportamento è probabilmente dovuto a qualche reazione parassita che impedisce una corretta carica della cella. In effetti alla successiva scarica è possibile recuperare solo il 50% della capacità caricata in precedenza. Nei cicli successivi la situazione va lentamente migliorando e la capacità in scarica aumenta. Purtroppo la reazione parassita non è del tutto eliminata in quanto l'efficienza coulombica è sempre molto bassa. Dal 6° ciclo in poi il processo parassita sembra eliminato. La quantità di elettricità scaricata si avvicina a quella caricata e l'efficienza sale portandosi a 0,95.

a.3 Realizzazione e caratterizzazione di celle complete di taglia significativa

Questa attivitàm svolta interamente dall'ENEA, si articola in due fasi: la prima volta a risolvere i problemi di produzione e funzionalità dei materiali elettrodici con la ridefinizione del progetto di cella; la seconda alla realizzazione di divere celle di taglia significativa (fino a circa 100 mAh) ed alla loro caratterizzazione elettrochimica ed elettrica [rapporti RdS/PAR2013/183 e RdS/PAR2013/184]. La prima fase prevedeva il completamento dell'ottimizzazione dei processi di preparazione di materiali anodici e catodici per celle al litio individuati nel corso della precedente annualità.

I materiali sono stati scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale: quali il litio ferro fosfato come materiale catodico (per celle di alta energia e di alta potenza), la grafite MCMB (mesocarbon microbeads) come materiale anodico per celle di alta energia e potenza. In particolare tra le grafiti MCMB ne sono state selezionate due tipi: la prima del tipo "High Capacity G25" e la seconda "High Rate Discharge G-12". Tali materiali, testati negli anni precedenti in celle complete, sono stati utilizzati per la realizzazione in scala di celle di capacità significativa (fino a circa 100 mAh) e per l'esecuzione delle verifiche finali sulle soluzioni finora individuate. La produzione degli elettrodi è stata accompagnata da una completa caratterizzazione strutturale, chimica ed elettrochimica dei vari prodotti, prima del loro assemblaggio in celle complete.

Le celle complete così prodotte sono state sottoposte a cicli di prova elettrochimica per verificarne prestazioni e vita utile, secondo le procedure di prova concordate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE, in diverse condizioni operative tipiche delle applicazioni individuate per la rete elettrica.

Sintesi e caratterizzazione dei materiali elettrodici

I catodi per le batterie litio-ione sono preparati generalmente miscelando la polvere del materiale attivo, il legante, il solvente e gli additivi per formare un impasto che viene poi inviato ad una macchina da stesa. Un elettrodo anodico è realizzato in modo analogo, miscelando grafite come materiale attivo, il legante, il solvente e gli additivi e inviando questa pasta ad una macchina di stesa. Le macchine per la stesa trasferiscono la pasta catodica ed anodica rispettivamente su fogli di alluminio e di rame. I fogli metallici rivestiti con il materiale catodico ed anodico vengono lasciati asciugare per eliminare il solvente e successivamente calandrati per rendere lo spessore degli elettrodi uniforme. Segue infine un'operazione di taglio per il corretto dimensionamento degli elettrodi. Al termine dell'operazione si ottiene un film continuo elettrodico steso su supporto di rame (per l'anodo) o alluminio (per il catodo).

Come materiale catodico è stato utilizzato il litio ferro fosfato (Gelon LIB Group) mentre come materiali anodici sono state impiegate due grafiti commerciali del tipo “High Capacity G25” (HC-G25) per celle ad alta capacità e “High Rate Discharge G-12” (HRD-G12) per celle ad alta potenza (entrambe fornite dalla Gelon LIB Group). Il carbone del tipo Super P (MMM CARBON, Willebroek, B) è stato usato per aumentare la conduttività elettronica degli elettrodi.

Il materiale catodico $LiFePO_4$, che si presenta all’apparenza come polvere sottile di colore grigio, è stato sottoposto ad una completa analisi chimico-fisica. La morfologia del campione è stata studiata mediante microscopia elettronica. Il campione è stato montato su un nastro conduttivo di carbone, precedentemente attaccato sul porta campioni. La Figura 16a riporta la morfologia del campione osservata a basso ingrandimento. Il campione si presenta uniforme con delle aggregazioni dense di dimensione dai 10 ai 200 μm. La Figura 16b mostra la stessa immagine ottenuta per retrodiffusione degli elettroni (immagine in back scattering). Le parti più luminose sono quelle più ricche in ferro. Dato che le due immagini sono sovrapponibili, il campione si presenta molto uniforme su scala macroscopica.

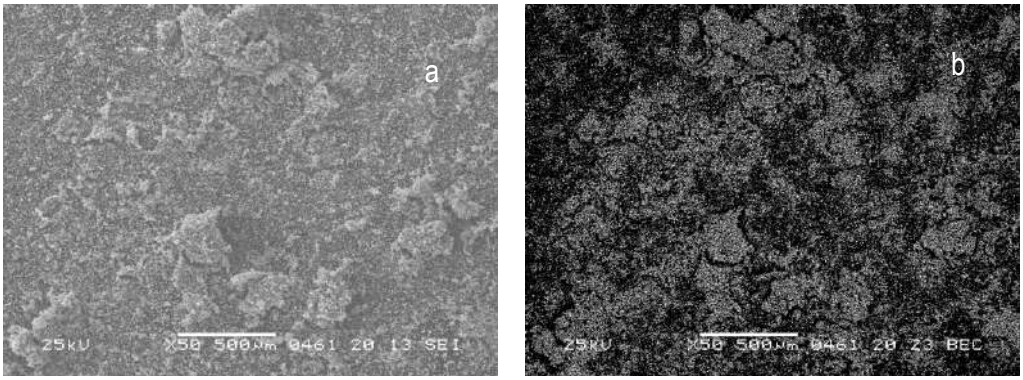


Figura 16. a) Micrografia a piccolo ingrandimento (X50) del campione e b) back scattering dell’immagine

La composizione elementare del campione è stata studiata mediante analisi di dispersione elettronica dei raggi X (EDS) tramite il sistema IXRF EDS-2000. La figura 17 mostra una micrografia a piccolo ingrandimento (X50) del campione e la corrispondente analisi EDS. La composizione percentuale in ferro e fosforo risulta essere pari a 48:52 in rapporto atomico (lo stechiometrico sarebbe risultato 50:50). Pertanto il campione ha una buona uniformità anche a livello microscopico.

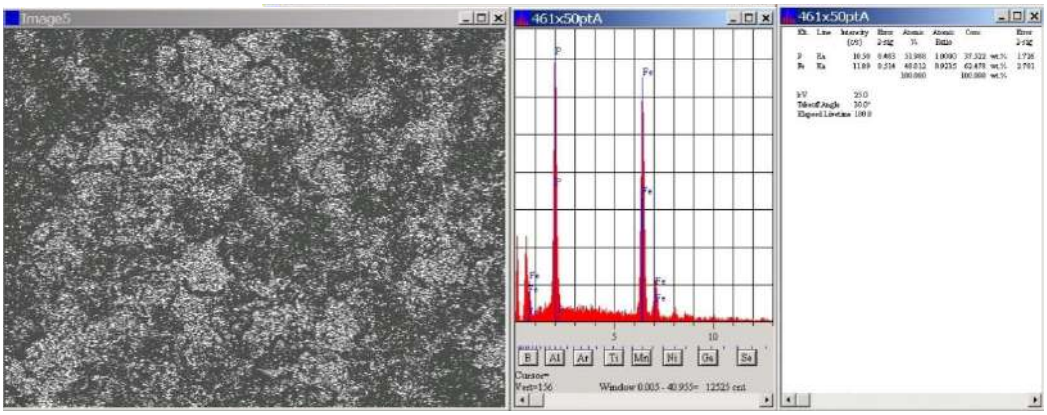


Figura 17. Micrografia a piccolo ingrandimento (X50) del campione, analisi EDS e composizione percentuale in ferro e fosforo

La caratterizzazione XRD è avvenuta sulla polvere tal quale. E’ stato usato un rifrattometro con lampada in rame (λ = 1,54 Å). La figura 18 riporta il diffrattogramma ai raggi X del campione. I picchi di diffrazione sono facilmente riconducibili a quelli del litio ferro fosfato cristallino con struttura di tipo olivina.

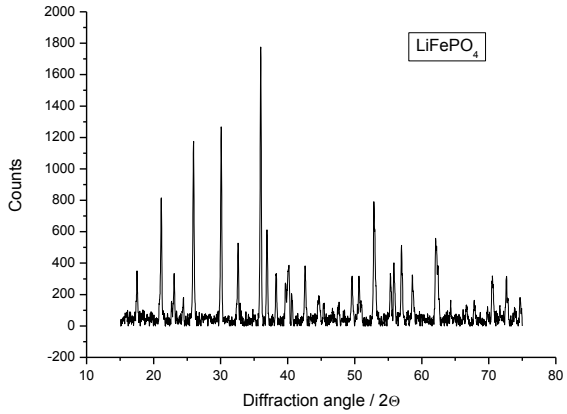


Figura 18. Diffrattogramma ai raggi X del campione di $LiFePO_4$

Lo stesso tipo di caratterizzazioni sono state condotte anche sui materiali anodici. Per la realizzazione della batteria ad elevata energia e/o elevata potenza sono state selezionate grafite del tipo "High Capacity G25" (HC-G25) e grafite "High Rate Discharge G-12". A livello microscopico entrambe i materiali presentano particelle con una struttura sferica con dimensioni dell'ordine del µm. Tale struttura risulta particolarmente interessante per quel che concerne la possibilità di un facile impaccamento, da cui può derivare un'alta densità volumetrica dell'elettrodo. La superficie specifica, non particolarmente elevata, può anche ridurre al minimo le reazioni collaterali durante il processo di carica-scarica.

In Figura 19 si riporta il diffrattogramma ai raggi X dei due campioni di grafite in studio. I diffrattogrammi appaiono molto simili tra loro e i picchi di diffrazione sono facilmente riconducibili a quelli della grafite.

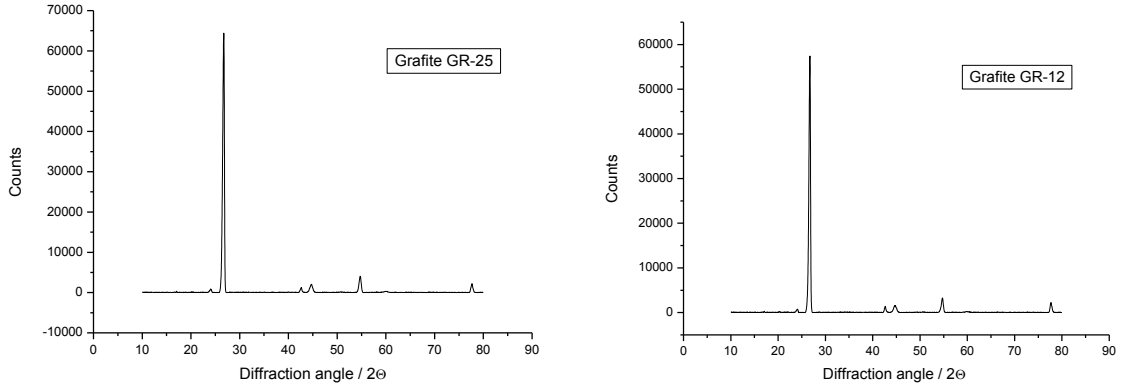


Figura 19. Diffrattogramma ai raggi X dei campione di grafite

Preparazione degli elettrodi catodici per batterie ad alta energia e loro caratterizzazione elettrochimica

Per la preparazione dell'elettrodo catodico per batterie ad alta energia sono stati pesati 0,70 g di $LiFePO_4$ e 0,15 g carbone Super P. I due materiali sono amalgamati in mortaio per alcuni minuti in modo da mescolarli intimamente. A parte si pesano 0,30 g di un polimero vinilico (al 50% in peso) disperso in acqua. La dispersione è addizionata con 10 mL di acqua. Alla soluzione si aggiunge poco alla volta la miscela di polveri e si amalgama in modo da disperdere le polveri nella soluzione acquosa. Si ottiene in tal modo una pasta molto fluida, questa è stesa a più riprese su un foglio di alluminio coprendo una superficie di 50 cm^2. Dopo ogni aggiunta si lascia evaporare l'acqua in essa contenuta prima di passare ad una successiva stesa. Al termine il foglio è lasciato asciugare all'aria a 120 °C per 1 ora. L'elettrodo si presenta molto uniforme da un punto di vista macroscopico (Figura 20).



Figura 20. Immagine dell'elettrodo catodico depositato sul collettore di corrente di alluminio

L'elettrodo è coperto con un foglio di alluminio e posto tra due fogli di mylar da 100 µm e calandrato fino allo spessore di 450 µm. Si ritagliano dalla stesa degli elettrodi circolari da 12 mm di diametro che vengono montati su celle a T, utilizzando come contro elettrodo ed elettrodo di riferimento un disco di litio metallico. Il peso del materiale attivo era compreso tra 16,0 e 19,0 mg. La densità specifica di materiale attivo nell'elettrodo è compresa tra 15,0 e 16,8 mg cm^{-2}. La capacità dell'elettrodo (considerando una capacità teorica di 170 mAh g^{-1}) è compresa tra 3,24 e 2,87mAh. Gli elettrodi sono fatti ciclare a corrente costante secondo una definita procedura.

La cella ha effettuato 80 cicli mostrando una buona ciclabilità anche se i valori assoluti di capacità specifica nei cicli a C/10 rate erano inferiori a quelli valutati in precedenza. La capacità specifica iniziale a C/10 era di 125 mAh g^{-1} ma la stessa è aumentata con il numero dei cicli raggiungendo il valore di 135 $mAhg^{-1}$ dopo 80 cicli. La capacità valutata a C rate era compresa tra 80 e 90 mAh g^{-1}. Dopo il 50° ciclo la capacità è aumentata fino a portarsi ad un valore di 110 mAh g^{-1}ed è poi diminuita nei 30 cicli successivi per ritornare ai valori iniziali.

Per quanto riguarda la ciclabilità, questa è buona per i cicli condotti a C/10 rate mentre quando si aumenta la velocità di scarica si assiste ad una diminuzione della capacità specifica con il progredire del numero dei cicli (figura 21 b).

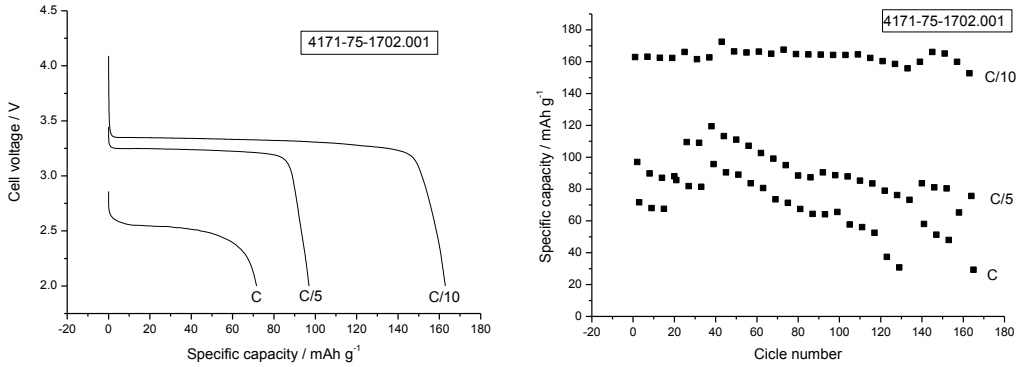


Figura 21. Profili di tensione in funzione della capacità specifica (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per un elettrodo a base di $LiFePO_4$ per celle ad alta capacità fatto ciclare in una cella al Li metallico. La cella è fatta ciclare a C/10, C/5 e C rate. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C rate fino a 4,2 V seguita da una carica potenziostatica a 4,2 V fin quando la corrente diminuisce ad un valore pari a C/10

Preparazione degli elettrodi catodici per batterie ad alta potenza e loro caratterizzazione elettrochimica

E' noto che lo spessore dell'elettrodo influenza la capacità di carica/scarica, la densità di energia, la densità di potenza e il comportamento ciclico a lungo termine. Lo spessore dell'elettrodo ha anche un impatto significativo sulla densità di energia. Infatti la preparazione di un elettrodo più denso determina la riduzione della frazione dei componenti elettrochimicamente inattivi, quali il collettore di corrente ed il separatore. Nel paragrafo precedente è stata descritta la preparazione e la caratterizzazione di elettrodi "spessi" che troveranno utilizzazione per la realizzazione di batterie ad alta energia. D'altra parte elettrodi troppo spessi sono inefficienti per batterie ad alta potenza per le quali si richiedono scariche molto veloci. Per funzioni di alta potenza sono stati quindi preparati e caratterizzati elettrodi "sottili".

Si pesano 0,350 g di $LiFePO_4$ e 0,084 g di carbone Super P. I due materiali sono amalgamati in mortaio per alcuni minuti in modo da mescolarli intimamente. A parte si pesano 0,1 g di una soluzione acquosa al 50% di un polimero vinilico e si sciolgono in 1 mL di acqua. Alla soluzione si aggiunge poco alla volta la miscela di polveri e si amalgama in modo da disperdere le polveri nella soluzione acquosa. Si ottiene in tal modo una pasta abbastanza fluida. La pasta è stesa a più riprese su un foglio di alluminio coprendo una superficie di 50 cm^2. Al termine della stesa il foglio è lasciato asciugare in stufa a 100 °C sotto vuoto per una notte. Dalla stesa si ritagliano quindi elettrodi di diametro 10 mm, dal peso di 10,4 mg in cui il peso del materiale attivo è di circa 7,5 mg.

Uno degli elettrodi è inserito in una cella al litio e fatto ciclare a C/10 per 10 cicli (i = 0,13 mAh). La Figura 22 riporta i profili di tensione in funzione della capacità specifica (a) e la capacità specifica erogata in scarica e carica in funzione del numero dei cicli (b). Nella Figura 22b è anche riportato il coefficiente di carica inteso come il rapporto tra le capacità in carica e in scarica.

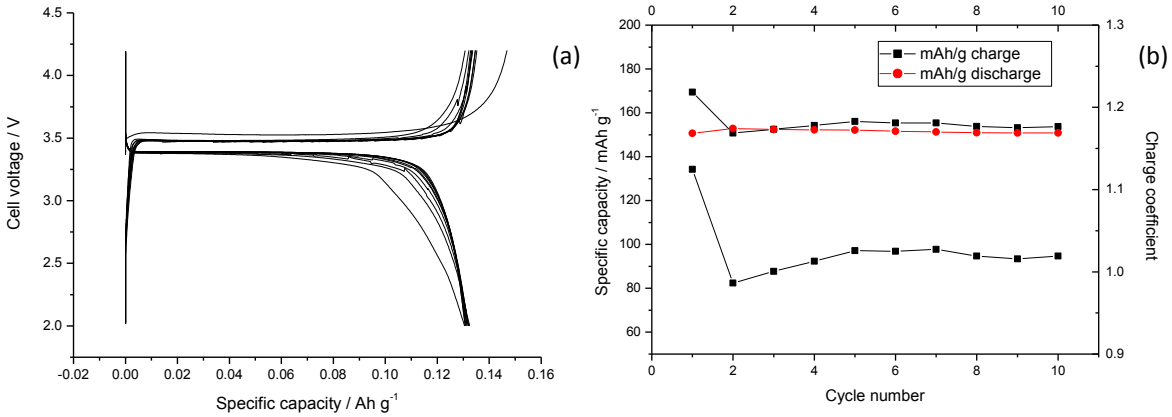


Figura 22. Profili di tensione in funzione della capacità specifica (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per un elettrodo a base di $LiFePO_4$ fatto ciclare in una cella al litio metallico a rate di carica/scarica pari a C/10

Dal grafico in Figura 22a si nota che il materiale si carica ad un valore di tensione prossimo a 3,47 V mentre scarica a circa 3,36 V. Dal grafico in Figura 22b si evince che la capacità specifica al primo ciclo di carica è prossima a 170 mAh per grammo. In scarica il materiale eroga circa 150 mAh g^{-1} e tale valore rimane costante durante i successivi cicli di scarica.

Per valutare l'effetto della velocità di scarica sulla capacità esibita, un secondo elettrodo è stato inserito in una cella al litio e fatto ciclare a differenti correnti (0,13, 0,26, 1,3, 3,9 e 6,5 mA) pari a rate di scarica di C/10, C/5, C, 3C e 5C. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C rate fino a 4,4 V, seguita da una carica potenziostatica a 4,4 V fin quando la corrente diminuisce ad un valore pari a C/10. La Figura 23a mostra i profili di tensione di cella registrati ai diversi rate di scarica. Quando scaricata a C/10 rate, l'elettrodo è in grado di fornire gran parte della capacità specifica riferita al peso del materiale attivo (150 mAh g^{-1}). All'aumentare della corrente di scarica si assiste ad una diminuzione della capacità specifica che raggiunge i 140 mAh g^{-1}a C/5 rate, 120 mAh g^{-1}a C rate e 50 mAh g^{-1} a velocità di scarica cinque volte maggiori (5C). Questi valori risultano notevolmente superiori a quelli

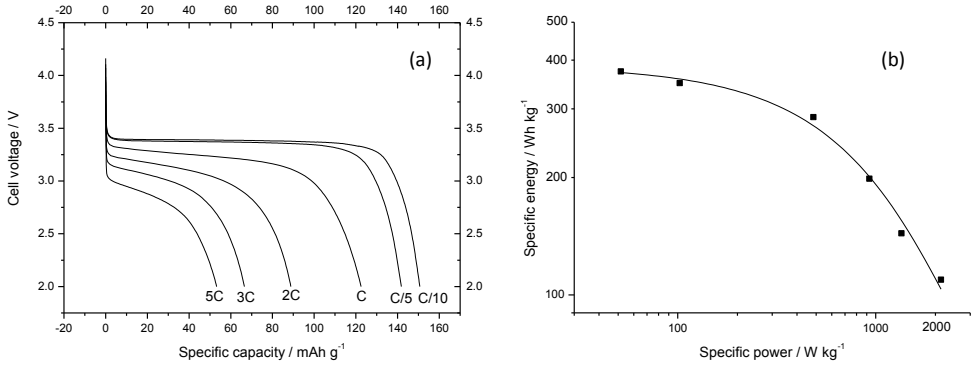


Figura 23. Profili di tensione in funzione della capacità specifica per una cella scaricata a differenti rate di scarica (a); diagramma di Ragone ottenuto utilizzando i valori di capacità specifica, rate di scarica e tensione media di scarica

registrati con elettrodi spessi. Progressivamente alla diminuzione della capacità con l'aumentare del rate di scarica si assiste ad una diminuzione della tensione di cella. Il risultato è riportato in Figura 23b dove si mostra il plot di Ragone (energia specifica in funzione della potenza specifica). A bassa potenza la cella era in grado di erogare circa 400 W per kg di materiale attivo (dato basato solo sul peso del $LiFePO_4$ nel catodo). All'aumentare del rate di scarica si assiste ad una diminuzione dell'energia specifica. La cella era comunque capace di scaricare ancora circa il 25% della sua energia quando scaricata a potenze dell'ordine di 2000 W per kg di materiale attivo (anche questo dato basato solo sul peso del $LiFePO_4$ nel catodo).

Preparazione degli elettrodi anodici per batterie ad alta energia e loro caratterizzazione elettrochimica

Analogamente a quanto fatto per gli elettrodi catodici, sono stati preparati elettrodi anodici con ricette e procedure appositamente sviluppate. La Figura 24 riporta un'immagine dell'elettrodo. Per la caratterizzazione elettrochimica sono stati ritagliati degli elettrodi circolari da 12 mm di diametro che sono stati montati su celle a bottone, utilizzando del litio metallico come contro elettrodo ed elettrodo di riferimento. Il peso del materiale attivo era compreso tra 5,4 e 7,9 mg. La densità specifica di materiale attivo nell'elettrodo è compresa tra 4,7 e 6,9 mg cm^{-2}.

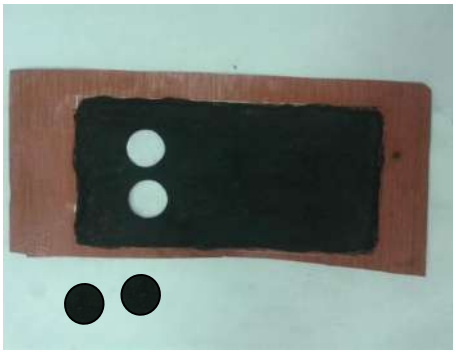


Figura 24. Immagine dell'elettrodo anodico a base di Grafite HD-G25

Per valutare la ciclabilità dell'elettrodo questo è stato fatto ciclare in carica e scarica a corrente pari a C/10 rate tra 0,01 e 1,0 V. La Figura 25a mostra a sinistra il profilo di tensione di cella relativo al primo ciclo in funzione della capacità specifica e la Figura 25b l'andamento della capacità specifica in funzione del numero dei cicli. Come verificato nella precedente esperienza, la capacità irreversibile al primo ciclo è di circa 360 mAh g^{-1}. La capacità recuperata in carica è di 300 mA g^{-1}. Di conseguenza il coefficiente di carica è circa 0,82. Anche in questo caso la situazione migliora nei cicli successivi in cui la capacità in scarica diminuisce e quella in carica aumenta e già dal 6° ciclo il coefficiente di carica assume un valore prossimo all'unità con una capacità specifica in carica e scarica pari a 300 mAh g^{-1}. A partire dal 20° ciclo la capacità subisce una leggera flessione probabilmente legata a qualche problema incorso durante la prova. La capacità si porta ad un valore di circa 275 mAh g^{-1} e tale valore è mantenuto inalterato fino al termine della prova.

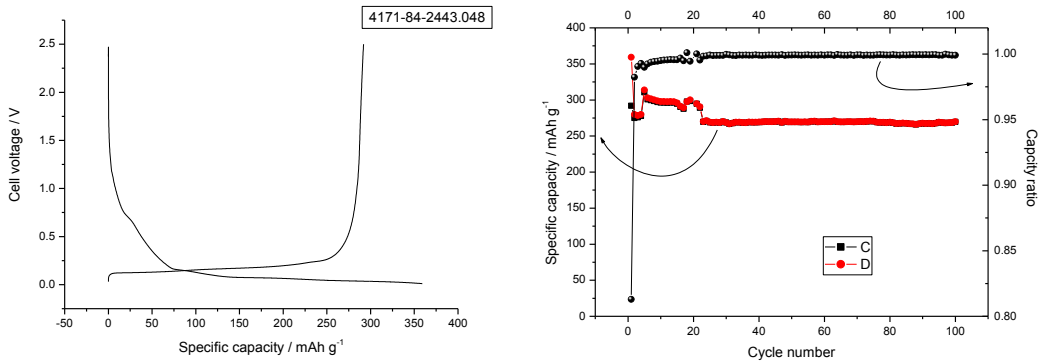


Figura 25. Profilo di tensione in funzione della capacità specifica al primo ciclo (a) e andamento della capacità specifica erogata in funzione dei cicli (b) per un elettrodo a base di grafite HC-G25 fatto ciclare in una cella al litio metallico. La cella è fatta ciclare in carica e scarica a C/10 rate tra 0,01 e 1,0 V. Nella figura b è riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

Analogamente a quanto fatto per l'elettrodo catodico, è stato anche preparato e caratterizzato l'elettrodo anodico per applicazioni di alta potenza.

Preparazione di celle litio-ione e loro caratterizzazione elettrochimica

Sono state realizzate celle litio ione del tipo ad alta energia e ad alta potenza. Le caratteristiche degli elettrodi utilizzati nelle prime prove sono riportate in Tabella 9.

Tabella 9. Elettrodi utilizzati per la preparazione di batterie litio ione

Elettrodo	Cella	Peso (g)	Peso m.a. (g)	Capacità* (mAh)	Rapporto	Cap. rev.	Sigla
$LiFePO_4$	A	16	12	1,8	1,38		
HC-G25	A	4,1	3,4	1,3	0,72	1,02	4171.56.1473.021
$LiFePO_4$	B	18,9	14,17	2,2	0,95		
HRD-G12	B	7,4	6,1	2,32	1,05	1,0	4171.56.1506.022

* Per il calcolo della capacità è stata usata una capacità specifica pari a 150 mAh g^{-1} per il $LiFePO_4$. Per la grafite HC-G25 è stata usata una capacità di 360 $mAhg^{-1}$ (capacità irreversibile + capacità reversibile) e 300 mAh g^{-1} per la capacità reversibile. Per la grafite HRD-G12 è stata usata una capacità di 380 mAh g^{-1} (capacità irreversibile + capacità reversibile) e 280 $mAhg^{-1}$ per la capacità reversibile

Le due tipologie di cella realizzate si sono comportate in maniera analoga. All'inizio della ciclazione entrambe hanno mostrato una resistenza di cella abbastanza bassa e una capacità prossima a quella nominale. Durante il processo di carica, il potenziale è andato progressivamente aumentando fino a portarsi al valore di 4,0 V. Con il progredire della ciclazione la capacità è progressivamente diminuita e parallelamente la resistenza di cella è aumentata sia in carica che in scarica. Dopo i primi dieci cicli di carica e scarica che hanno mostrato una discreta reversibilità, si è assistito ad un progressivo decremento della capacità che in breve tempo è scesa a valori molto bassi. La ciclazione è stata interrotta prima che il programma avesse termine. La perdita di capacità riscontrata in entrambe le celle è probabilmente da ascriversi ad un valore troppo alto nel potenziale di fine carica. Infatti fin quando la tensione di fine carica è rimasta bassa, le celle hanno ciclato in maniera reversibile. Con l'aumentare della tensione di fine carica si è assistito ad un depauperamento degli ioni litio con conseguente perdita di reversibilità del processo. Con gli elettrodi preparati in precedenza sono state realizzate altre due batterie litio ione (Tabella 10).

Tabella 10. Elettrodi utilizzati per la preparazione di batterie litio ione

Elettrodo	Cella	Peso (g)	Peso m.a. (g)	Capacità* (mAh)	Rapporto	Cap. rev.	Sigla
$LiFePO_4$	A	22,6	16,95	2,5425	1,17		
HC-G25	A	6,9	5,727	2,17626	0,85	1,72	4171.84.6356.006
$LiFePO_4$	B	20,6	15,45	2,3175	1,24		
HC-G25	B	5,9	4,897	1,86086	0,8	1,50	4171.84.6410.026

* Per il calcolo della capacità è stata usata una capacità specifica pari a 150 mAh g^{-1} per il $LiFePO_4$. Per la grafite è stata usata una capacità di 380 mAh g^{-1} (capacità irreversibile + capacità reversibile) e 300 mAh g^{-1} per la capacità reversibile

Entrambe le batterie erano bilanciate in eccesso di catodo essendo il rapporto tra le capacità anodica e catodica pari a 1,17 e 1,24. Le batterie sono poste in celle a bottone e ciclate. La Figura 26a mostra l'andamento della tensione in funzione del tempo e la Figura 26b la capacità specifica in funzione del numero dei cicli per la cella in cui il potenziale di fine carica è stato limitato a 3,9 V. La tensione di fine carica della batteria è risultata inferiore a 3,9 V solo nei primi due cicli. La capacità caricata al primo ciclo era circa 300 mAh g^{-1}. Quella recuperata era pari a 225 mAh g^{-1}, con un coefficiente di carica pari a 1,35. Il coefficiente di carica si è ridotto nei primi 4-cicli raggiungendo un valore di poco superiore all'unità. La capacità specifica in funzione dei cicli tende a diminuire con il progredire della ciclazione ma in misura inferiore a quanto registrato in precedenza. La Figura 27 mostra l'andamento della tensione di cella in funzione del tempo (a) e la capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per la cella in cui il potenziale di fine carica è stato limitato a 3,5 V.

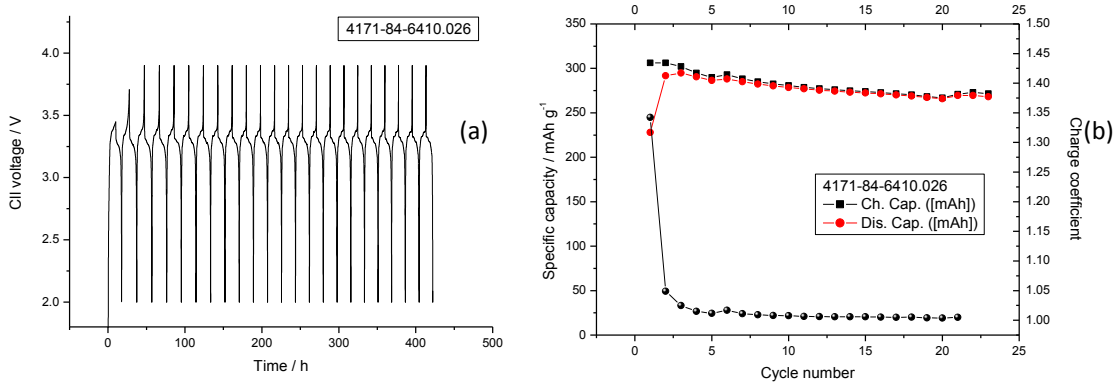


Figura 26. Profilo di tensione in funzione del tempo (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per la batteria litio-ione - Cella B. La batteria è stata fatta ciclare in scarica ed in carica a C/10 rate tra 3,9 e 2,0 V. Nella figura di destra è riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

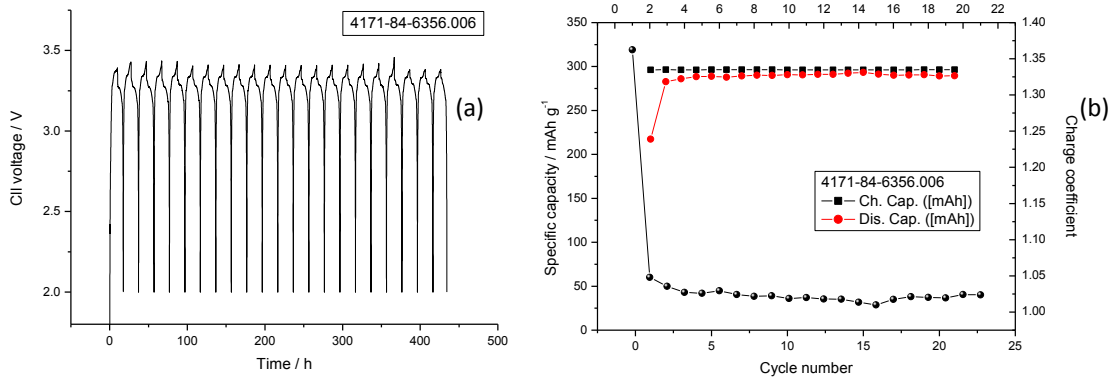


Figura 27. Profilo di tensione in funzione del tempo (a) e capacità specifica in funzione del numero dei cicli (b) per la batteria litio-ione - Cella A. La batteria è stata fatta ciclare in scarica ed in carica a C/10 rate tra 3,5 e 2,0 V. Nella figura di destra è riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

La capacità caricata al primo ciclo era circa 300 mAh g^{-1}. Quella recuperata era leggermente inferiore a 225 mAh g^{-1}, con un coefficiente di poco superiore a 1,35. Mentre la capacità in carica è rimasta costante e pari a 300 mAh g^{-1}, quella in scarica è progressivamente aumentata ed il coefficiente di carica è diminuito raggiungendo un valore di poco superiore all'unità. La capacità specifica in funzione dei cicli è risultata superiore al risultato ottenuto nelle prove precedenti in cui la tensione di fine carica era settata a 4,0 e 3,9 V. Le due batterie sono state sospese dopo 22 cicli e fatte quindi ripartire a C rate e a rate variabile.

In particolare la carica è stata effettuata galvanostaticamente a corrente pari a C rate fino a raggiungere il valore di 3,5 V. Raggiunto questo valore di tensione la carica è proseguita in maniera potenziostatica fin quando la corrente non si è abbassata a raggiungere un valore pari a C/10 rate. Raggiunto questo valore è iniziata la carica galvanostatica condotta a C rate. Tale ciclo è stato ripetuto per mille volte. La Figura 28a riporta il profilo di tensione in carica e scarica (linea continua) e quello di corrente in carica (linea tratteggiata) mentre la Figura 28b mostra la capacità specifica in funzione del numero dei cicli. La batteria è stata in grado di caricare reversibilmente circa 250 mAh g^{-1}, di cui circa l'80% è stato caricato durante il processo galvano statico condotto a C rate. La batteria è stata in grado di scaricare reversibilmente gran parte della capacità caricata. La capacità in funzione del numero dei cicli è sensibilmente diminuita durante i primi 10 cicli di carica e scarica portandosi ad un valore prossimo ai 225 mAh g^{-1}. Successivamente la capacità è rimasta stabile permettendo così alla cella di compiere mille cicli di carica e scarica. La perdita di capacità durante gli ultimi 900 cicli è stata valutata pari a 30 mAh g^{-1} passando da 215 mAh g^{-1} (registrato al 100 ciclo) a 185 mAh g^{-1} (registrato al 1000 ciclo), con una perdita percentuale dello 0,015% per ciclo.

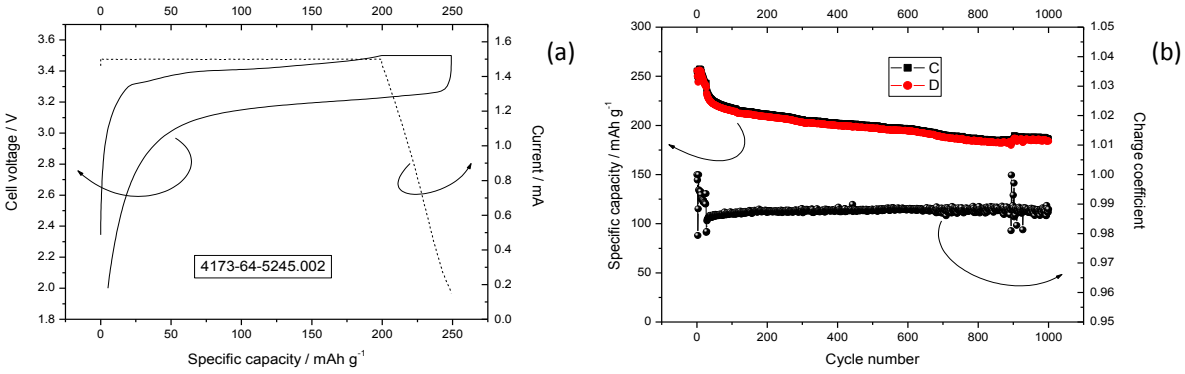


Figura 28. (a) Profilo di tensione (linea continua) e di corrente (linea tratteggiata) in funzione della capacità specifica per la batteria litio-ione - Cella A. La batteria è caricata a C rate fino a 3,5 V. Quindi è lasciata in carica potenziostatica fino a quando la corrente scende al di sotto di C/10 rate. La batteria è scaricata a C rate fino a 2,0 V; (b) andamento della capacità specifica in carica funzione dei cicli. Nella figura di destra è riportato anche il rapporto tra la capacità in carica e quella in scarica (pallini neri)

La seconda batteria è stata fatta ciclare a C/10, C/5, C/2, C, 3C e 5C rate. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C/10 rate fino a 3,5 V.

Entrambe le batterie sono bilanciate in eccesso di catodo essendo il rapporto tra le capacità anodica e catodica pari rispettivamente a 1,21 e 1,10. Le batterie sono poste in celle a bottone e ciclate.

Dalle prove effettuate sulle due tipologie di batterie è risultato che la tensione di fine carica ottimale deve essere inferiore a 3,7 V. La batteria ad alta energia è stata in grado di fornire gran parte della sua capacità (circa il 96% della capacità nominale) quando ciclata al rate di scarica più basso (C/10). Aumentando la velocità di scarica diminuisce la capacità erogata ma almeno il 50% della capacità valutata al C/10 è ancora disponibile quando la batteria è stata scaricata ad un rate di scarica pari a 5C. Le prestazioni della batteria possono essere schematizzata considerando le prestazioni elettrochimiche del materiale attivo in termini di capacità specifica (> 200 mAh g^{-1} @ C rate, dato basato solo sul peso dell'elettrodo negativo), ritenzione di capacità (50% @ 5C rate) e perdita trascurabile di capacità con l'avanzamento del numero di cicli.

Le prove effettuate sui campioni di materiali sviluppati per realizzare le celle in scala significativa hanno portato alle seguenti conclusioni:

- l'elettrodo per le batterie ad alta energia è stato in grado di scaricare circa 280 mAh g^{-1} quando scaricato ad un rate di scarica pari a C/10. L'elettrodo è stato ciclato per 100 cicli al termine dei quali era in grado di fornire una capacità specifica reversibile di circa 250 mAh g^{-1}. Aumentando la velocità di scarica la capacità diminuisce leggermente ma l'elettrodo mantiene gran parte di essa. Raddoppiando la corrente di scarica da C/10 a C/5 si assiste ad una diminuzione della capacità da 280 a 270 mAh g^{-1}. Nessuna variazione di capacità è poi osservata aumentando ulteriormente la corrente e passando da C/5 a C rate. Infine aumentando la corrente di scarica da 3C a 5C la capacità diminuisce fino a portarsi a 254 mAh g^{-1};
- dalle prove effettuate su due batterie di cui una ad alta energia ed una ad alta potenza è risultato che la tensione di fine carica ottimale deve essere inferiore a 3,7 V. Sono state quindi testate le batterie ad alta energia ed alta potenza. La batteria ad alta energia è stata in grado di fornire gran parte della sua capacità (circa il 96% della capacità nominale) quando ciclata al rate di scarica più basso (C/10). Aumentando la velocità di scarica diminuisce la capacità erogata ma almeno il 50% della capacità valutata al C/10 è ancora disponibile quando la batteria è stata scaricata ad un rate di scarica pari a 5C. Le prestazioni della batteria possono essere schematizzata considerando le prestazioni elettrochimiche del materiale attivo in termini di capacità specifica (> 200 mAh g^{-1} @ C rate, dato basato solo sul peso dell'elettrodo negativo), ritenzione di capacità (50% @ 5C rate) e perdita trascurabile di capacità con l'avanzamento del numero di cicli;
- la batteria ad alta potenza è stata in grado di scaricare al primo ciclo circa l'80% della capacità caricata. L'efficienza aumenta già al secondo ciclo raggiungendo un valore prossimo all'unità. La capacità specifica in funzione dei cicli tende leggermente a diminuire con il progredire della ciclazione. Aumentando la velocità di scarica diminuisce la capacità erogata ma almeno il 65% della capacità valutata a C/10 rate è ancora disponibile quando la batteria è stata scaricata ad un rate di scarica pari a 5C. Le prestazioni della

batteria possono essere schematizzate considerando le prestazioni elettrochimiche in termini di capacità specifica (170 mAh g^{-1}, @ C rate, dato basato solo sul peso dell'elettrodo negativo), ritenzione di capacità (65% @ 5C rate) e perdita trascurabile di capacità con l'avanzamento del numero di cicli.

Preparazione e caratterizzazione della batteria litio-ione ad alta energia ed ad alto rate di scarica

Sono stati dimensionati due sistemi di batterie, rispettivamente ad alta capacità ed ad alta velocità di scarica, entrambe basate sulla configurazione Cu-Anodo/Separatore/Catodo-Al. Partendo dalla condizione di avere una caduta ohmica massima di 100 mV per densità di corrente pari a C rate, è stata calcolata la massima densità di corrente di scarica che è risultata pari a $2{,}25 \times 10^{-3}$ A cm^{-2} per le batterie ad alta capacità e pari a $1{,}0 \times 10^{-3}$ A cm^{-2} per le batterie ad alto rate di scarica.

Considerando la capacità irreversibile della grafite, sono stati dimensionati gli elettrodi catodici ed anodici e sono stati calcolati il peso e lo spessore degli elettrodi per entrambe le tipologie di batterie. E' stato calcolato il peso dei componenti elettrochimicamente inattivi quali il separatore ed i collettori di corrente. Infine sommando i pesi e gli spessori individuali dei componenti del sistema è stato calcolato Il peso e lo spessore della batteria. A questo punto è stato possibile valutare sia la densità energetica gravimetrica che quella volumetrica che sono risultate pari a 75 Wh kg^{-1} e 150 Wh L^{-1} per le batterie ad alta energia e 64 Wh kg^{-1} e 130 Wh L^{-1} per le batterie ad alto rate di scarica. Inoltre è stato possibile valutare la dimensione totale degli elettrodi necessaria per la realizzazione di batterie da 100 mAh che è risultata pari a 70 cm^2 per le batterie ad alta energia e 83 cm^2 per le batterie ad alto rate di scarica.

Si è passati quindi a valutare una possibile configurazione degli elettrodi e della batteria. (Figure 29-32).

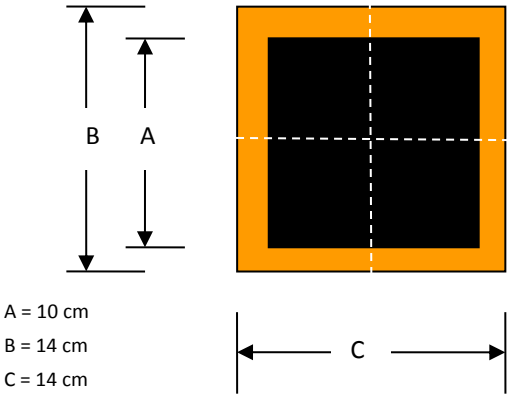


Figura 29. Dimensioni del foglio elettrodico sul quale effettuare la stesa

Si ipotizza di stendere gli elettrodi su una superficie quadrata di 14 cm di lato, coprendo una superficie quadrata di 10 cm di lato, in modo da avere tutti i bordi scoperti di circa 2 cm. Il nastro viene tagliato in quattro parti come indicato in figura (linea tratteggiata) in modo da ricavare quattro elementi, uguali a due a due.

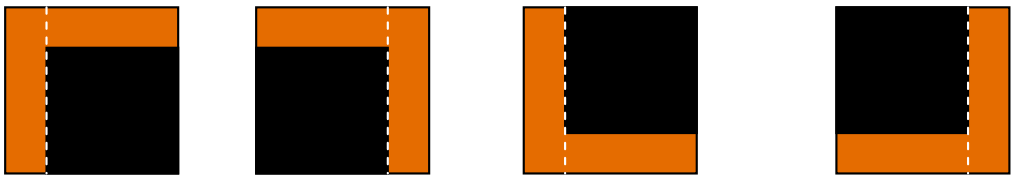


Figura 30. Elementi ottenuti ritagliando il foglio elettrodico.

Infine gli elettrodi anodici e catodici saranno assemblati tra loro utilizzando un foglio di separatore di forma quadrata di 5,5 cm di lato (Figura 31).

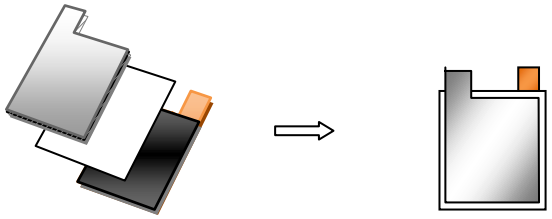


Figura 31. Preparazione di un elemento di batteria ottenuto ponendo tra un elettrodo catodico ed uno anodico un foglio di separatore

Per le celle ad alta capacità si è ipotizzato di usare tre elettrodi mentre per quelle ad alto rate di scarica quattro elettrodi, per un totale di 75 e 100 cm^2.

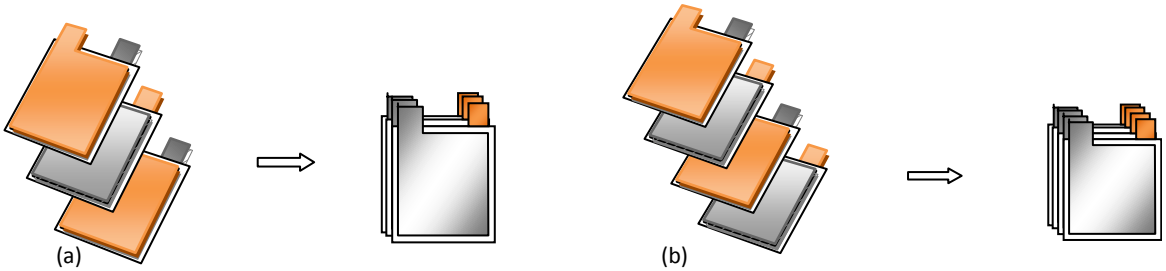


Figura 32. Schemi di preparazione di una batteria ad alta capacità (a) e ad alto rate di scarica (b)

Quindi si è passati alla realizzazione dell'elettrodo catodico stendendo sul foglio di alluminio circa 1,9-2,0 g di miscela catodica. La morfologia e lo spessore sono state valutate mediante microscopia elettronica. L'elettrodo si presenta molto uniforme sia da un punto di vista macroscopico che microscopico con uno spessore compreso tra 150 e 180 µm. Analogamente è stato preparato l'elettrodo anodico stendendo sul foglio di rame circa 0,7-0,8 g di miscela anodica. L'elettrodo si presenta molto uniforme da un punto di vista macroscopico mentre a livello microscopico questo risulta molto rugoso con uno spessore compreso tra 50 e 100 µm. Dai fogli sono stati ritagliati gli elettrodi. Gli elettrodi sono stati pesati e la loro capacità è stata valutata. Per il calcolo della capacità sono state usate una capacità specifica pari a 160 mAh g^{-1} per il $LiFePO_4$, e di 360 mAh g^{-1} per la grafite (capacità irreversibile + capacità reversibile) e 300 mAh g^{-1} per la capacità reversibile della grafite.

Per la realizzazione delle batterie è stata preparata una soluzione di colla stirenica in acqua. Si ritagliano i separatori in fibra di vetro e le celle si assemblano ponendo tra gli elettrodi un unico foglio separatore. Il separatore è bagnato con la soluzione contenete il polimero legante e fatto aderire agli elettrodi. Le celle sono sovrapposte tra di loro e poste sotto pressione stringendole tra due piastre di alluminio La batteria è lasciata asciugare prima a temperatura ambiente per una notte e poi a 120 °C sotto vuoto per un ugual periodo di tempo (Figura 33). La batteria è posta in una vaschetta riempita con l'elettrolita e il tutto è posto sotto vuoto moderato (200 mbar) per alcuni minuti per facilitare l'ingresso dell'elettrolita. Dopo tale operazione la batteria è asciugata e pesata per valutare la quantità di elettrolita penetrato nella stessa.

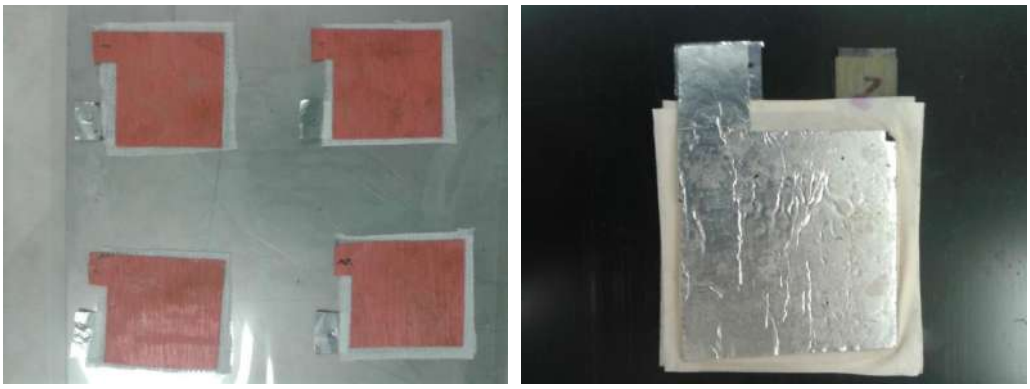


Figura 33. Foto delle celle dopo l'essiccamento in stufa (a) e delle celle collegate tra loro a formare la batteria (b)

Dai pesi percentuali si evince che l'elettrolita è il componente presente in percentuale maggiore (oltre il 50% del peso totale). In futuro occorrerà effettuare uno studio per valutare la possibilità di ridurre la quantità di elettrolita e trovare la quantità minima capace di assicurare il trasporto degli ioni litio senza incidere in maniera così determinante sul peso della batteria.

Le celle così ottenute sono collegate in parallelo tra loro e la batteria risultante sigillata sotto vuoto. Prima delle prove elettrochimiche sulle batterie è stata eseguita una misura di impedenza per valutare la resistenza dell'elettrolita e quella al trasferimento di carica. Dalla spettroscopia di impedenza si evince che, in tutte le batterie, la resistenza dell'elettrolita è inferiore all'ohm, da cui risulta una conducibilità specifica dell'ordine di $1.0x10^{-4}$ S. La resistenza al trasferimento di carica è di circa una decina di ohm, cui corrisponde una resistenza specifica di un migliaio di Ω cm^2.

Le batterie sono quindi collegate al ciclatore e fatte ciclare mediante cicli galvanostatici. Le batterie ad alta capacità si sono comportate in maniera analoga tra loro. Durante il primo ciclo, le batterie sono riuscite a caricare circa un centinaio di mAh. Di questi ne sono stati rilasciati circa l'80%. Durante il seguente ciclo, le batterie sono riuscite a caricare reversibilmente circa 75 mAh. Nei cicli successivi si nota una lenta ma progressiva diminuzione della capacità della batteria. L'efficienza coulombica si stabilizza a valori molto alti (0,97-0,98) già a partire dal secondo ciclo e tende a rimanere costante nei cicli successivi.

Per valutare l'effetto della velocità di scarica sulle prestazioni della batteria, una delle batterie è stata fatta scaricare a differenti rate di scarica pari a C/10, C/5, C/2 e C rate. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C/10 rate fino a 3,7 V. La batteria al più basso rate di scarica (C/10) ha erogato una capacità pari a 55 mAh. La capacità è diminuita all'aumentare del rate di scarica ma si è mantenuta su valori relativamente alti per scariche fino a C/2. A C rate la capacità diminuisce in maniera sostanziale. Anche i valori di tensione media di scarica diminuiscono in maniera sensibile passando da 3,05 V (C/10) a 2,80 V (C/5) a 2.43 V (C/2) fino a 2.17 V (a C rate). Il plot di Ragone mostra che l'energia della batteria è di 200 mWh quando scaricata 30 mW e si abbassa a soli 10 mWh quando scaricata 250 mW.

Nelle batterie ad alto rate si è notato un valore più basso della resistenza al trasferimento di carica, cui corrisponde una resistenza specifica di pochi centinaia di ohm cm^2. Durante il primo ciclo, una delle batterie è riuscita a caricare circa 100 mAh. Di questi ne sono stati rilasciati 78 mAh. L'efficienza coulombica è stata di poco superiore a 0,78. Durante il seguente ciclo, la batteria è riuscita a caricare reversibilmente circa 80 mAh. Nei cicli successivi si nota una progressiva diminuzione della capacità della batteria. L'efficienza coulombica si stabilizza a valori superiori a 0,98 nel secondo ciclo e tende a rimanere costante nei cicli successivi.

Per valutare l'effetto della velocità di scarica sulle prestazioni della batteria, la stessa è stata fatta scaricare a differenti rate di scarica pari a C/10, C/5, C/2 e C rate. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C/10 rate fino a 3,7 V. I profili di tensione registrati alle diverse correnti di scarica sono riportati in figura 34a sinistra, mentre il plot la Figura 34b riporta in doppio logaritmico, l'energia della batteria in funzione della potenza (plot di Ragone).

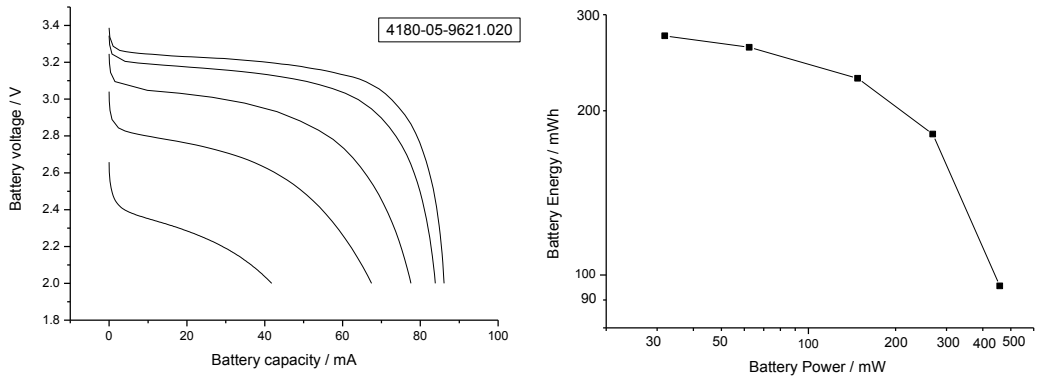


Figura 34. Profili di tensione in funzione della capacità specifica (a) e energia erogata in funzione della potenza di scarica (b) per una batteria litio-ione ad alta capacità. La cella è stata scaricata fino a 2,0 V a C/10, C/5, C/2, C e 2C rate. La carica è stata effettuata galvanostaticamente a C/10 rate fino a 3,7 V

La batteria al più basso rate di scarica (C/10) ha erogato una capacità pari a 86 mAh. La capacità è diminuita all'aumentare del rate di scarica ma si è mantenuta su valori relativamente alti per scariche fino a C rate. A 2C rate la capacità diminuisce in maniera sostenuta portandosi a 41,7 mAh. Anche i valori di tensione media di scarica diminuiscono in maniera sensibile passando da 3,19 V (C/10) a 3.,12 V (C/5) a 2,96 V (C/2) a 2.69 V (C) fino a 2,29 V

(a 2C rate). Il plot di Ragone mostra che l'energia della batteria è leggermente inferiore a 300 mWh quando scaricata 30 mW e si abbassa a 200 mWh quando scaricata a 250 mW. La batteria riesce a scaricare ancora 90 mWh quando scaricata a 500 mW.

In termini di energia specifica le batterie ad alta capacità e quelle ad alto rate presentano una energia simile a bassi regimi di scarica (circa 32 Wh kg^{-1} la prima e 35 Wh kg^{-1} la seconda quando scaricate a C/10 rate). Ad alta velocità di scarica, la batteria ad alto rate ha avuto una netta perdita di prestazioni già a C rate (1.,5 Wh kg^{-1}, pari al 5% dell'energia scaricata a C/10) mentre quella disegnata per operare ad alte velocità di scarica ha mantenuto un discreto valore di energia specifica sia a C rate (23 Wh kg^{-1}, pari al 66% dell'energia scaricata a C/10) che a 2C rate (10,5 Wh kg^{-1}, pari al 30% dell'energia scaricata a C/10).

Informazioni sulle procedure di preparazione adottate per la preparazione delle celle e sui risultati delle prove eseguite sui diversi tipi ci celle si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/184.

b. Ricerca e sviluppo di batterie redox a flusso

L'interesse sulle batterie redox a flusso è molto aumentato negli ultimi anni specialmente per quanto riguarda l'uso in applicazioni stazionarie. L'unica batteria a flusso che ha raggiunto lo stadio di commercializzazione è la batteria Vanadio/Vanadio che impiega le coppie V^{5+}/V^{4+} (catodo) e $V^{3+}V^{2+}$ (anodo) in soluzioni concentrate di H_2SO_4 con un potenziale di cella di circa 1,24 V. Studi preliminari sui principali problemi della tecnologia e sulla formulazione di un modello di funzionamento per ottimizzarne la gestione sono stati condotti nell'annualità precedente. Il principale problema delle celle Vanadio/Vanadio è quello relativo alla concentrazione dei materiali attivi ed al fatto che si opera in soluzioni acquose. L'energia specifica della cella è limitata dalle concentrazioni dei materiali attivi che, per problemi di solubilità è attualmente nell'intorno di 1,5-2 M. Il potenziale massimo, sia per la Vanadio/Vanadio, che per altre coppie redox proposte, è limitato entro l'intervallo di stabilità elettrochimica dell'acqua. Altro problema è il costo e la selettività delle membrane.

Le attività dell'obiettivo, condotte in ENEA e presso l'Università di Camerino, sono finalizzate ad approfondire e superare questi problemi.

b.1 Ricerca sui modelli della cella redox Vanadio/Vanadio

Il modello di cella sviluppato dall'Università di Camerino nella precedente annualità è stato verificato su una batteria sperimentale al fine di migliorarne il funzionamento, ottimizzando i punti critici già identificati [rapporto RdS/PAR2013/185]. Il modello di riferimento è basato su metodi elettrochimici (misura di OCV) o spettrali (UV-visibile) ed è capace in ogni momento di determinare lo stato di carica (SOC) della cella. A tale scopo si è fatto uso di celle singole o di prototipi forniti da una ditta esterna a titolo gratuito.

Risultato finale della ricerca è stato un modello da inserire nel software di gestione della cella in modo da ottimizzare il suo funzionamento nel tempo ed una valutazione sperimentale dello stato della tecnologia.

In particolare, l'Università di Camerino ha cercato di migliorare il sistema sviluppato in precedenza che prevedeva la correlazione del potenziale a circuito aperto (OCV) misurato con una cella alimentata dai flussi in uscita dal reattore principale con gli spettri UV-visibile misurati con celle a flusso con cammino ottico pari a 0,2 mm in serie alla cella di misura dell'OCV. In conseguenza dei risultati non soddisfacenti dovuti alla variabilità degli spettri con l'SOC a causa della non linearità della legge di Lambert-Beer a concentrazioni elevate e della complessità degli spettri stessi, è stato messo a punto un sistema basato sulla coulometria a potenziale controllato per la determinazione delle concentrazioni delle varie specie. Nella presente annualità, l'attenzione è stata rivolta principalmente alla messa a punto di un metodo di determinazione delle concentrazioni delle varie specie (speciazione) attraverso titolazioni potenziometriche. Il sistema sviluppato permette di determinare lo stato di carica della cella, l'entità dello sbilanciamento ed ha il vantaggio di essere rapido e facilmente implementabile a basso costo con l'uso di titolatori automatici. I risultati ottenuti, inseriti in un sistema di gestione, possono costituire la base per decidere i tempi e il tipo d'intervento necessario a riportare la cella nelle condizioni ottimali di funzionamento.

Una cella a 10 elementi è stata sottoposta ad indagini relative alla determinazione delle resistenze in funzione dello stato di carica ed all'esame del comportamento delle singole celle che sono munite di opportuni contatti. Il sistema, fornito a titolo gratuito dalla Ditta AEA-Loccioni, ha un potenziale nominale pari a 12,5 V, piastre bipolari e utilizza membrane di Nafion con area pari a 600 cm^2. I serbatoi contengono 12,6 L di soluzione 1,6 M.

Dai dati di potenziale misurati immediatamente dopo l'applicazione di uno step di corrente è possibile calcolare la resistenza ohmica del sistema (metodo "*current interrupt*") tramite un opportuno programma di calcolo. Il risultato finale permette di ricavare l'andamento della resistenza in funzione dello stato di carica (Figura 35).

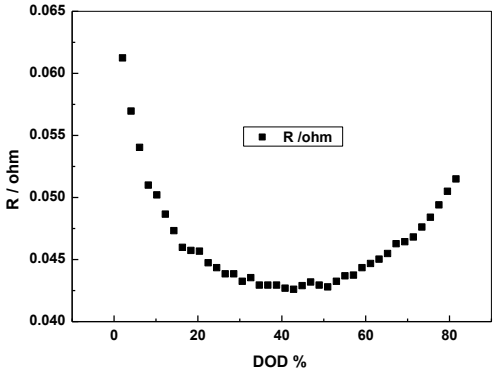


Figura 35. Resistenza ohmica in funzione dello stato di carica

Una sequenza di curve di scarica della cella a 10 elementi, con una corrente di scarica e scarica pari a 20 A fra i potenziali di cut-off 16,5-9 V, è stata eseguita per verificare l'andamento della capacità, che diminuisce progressivamente passando da 64,23 Ah a 56,43 Ah. Questo significa che la cella si sbilancia, con perdita di capacità, abbastanza velocemente. E' quindi necessaria la messa a punto di un metodo rapido per la determinazione delle concentrazioni reali di vanadio e degli stati di ossidazione relativi delle varie specie nelle due semicelle per decidere quali siano le azioni necessarie per riportare il sistema nelle condizioni ideali.

La Figura 36 mostra una curva di titolazione potenziometrica ottenuta utilizzando un elettrodo di carbone vetroso come elettrodo indicatore ed un elettrodo a calomelano (SCE) come riferimento. La soluzione di partenza è costituita da una porzione di una soluzione (5 cm^3) prelevata dal compartimento anodico di una cella quasi scarica diluiti in 125 cm^3 di 0,5 M H_2SO_4. Il titolante è una soluzione di $KMnO_4$ 0,1199 N.

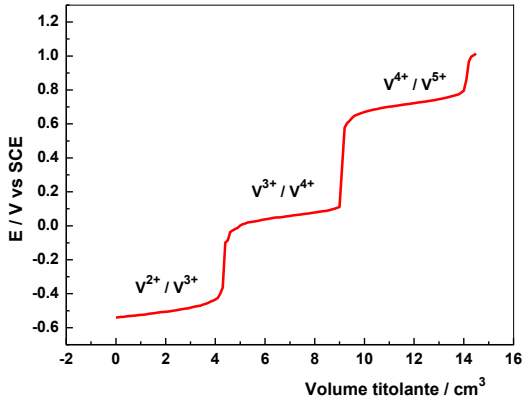


Figura 36. Curva di titolazione V^{2+}

Dalla curva si possono ricavare diversi parametri. I rapporti fra i volumi di titolante sono 0,877:1:1. Tenuto conto delle relative reazioni redox questo significa che nella soluzione di partenza il V^{3+} non era completamente ridotto a V^{2+}, ma presente in percentuale pari a 12,3% che corrisponde allo SOC della semicella. Dal volume di titolante consumato durante i successivi due step si può dedurre, fatti gli opportuni calcoli relativi alla diluizione, che la concentrazione totale di vanadio nella soluzione di partenza era pari a 1,5 M.

Per verificare la precisione della procedura sono state inoltre preparate soluzioni campione a concentrazione nota dei vari ioni. I risultati ottenuti dimostrano che l'errore medio nella determinazione delle concentrazioni è dell'ordine dello 0,2%.

Il metodo proposto non costituisce un modello della batteria redox Vanadio/Vanadio in senso stretto, ma essendo facilmente automatizzabile mediate l'uso di un titolatore automatico (tipo Metler), può essere integrato nel sistema per il controllo degli sbilanciamenti e delle prestazioni della cella.

La ricerca ha permesso di individuare le cause della perdita di capacità di una batteria redox a flusso Vanadio/Vanadio e i loro effetti sulle prestazioni e ha consentito di mettere a punto un sistema basato su titolazioni potenziometriche che permette di monitorare le concentrazioni delle varie specie determinandone lo stato di ossidazione.

b.2 Realizzazione e prova di prototipi di celle a flusso

Le attività hanno riguardato un aumento della densità energetica da ottenersi attraverso innovazioni sequenziali, sia a livello di materiali che di sistema. La ricerca su materiali elettrodici, ad esempio materiali porosi tridimensionali con proprietà catalitiche ottimizzate, può determinare un aumento della potenza in uscita per una determinata area elettrodica. L'identificazione di coppie redox stabili e con alta solubilità, così come un alto potenziale di cella nell'intervallo di temperatura desiderato, può garantire un aumento della energia accumulata.

Studi sulla progettazione sia delle celle che dei sistemi sono stati compiuti per tentare di apportare miglioramenti alle 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 si è cercato di dotare la cella di un sistema di controllo per l'integrazione nella rete, in modo da ottimizzare la gestione della potenza.

Studi di base su nuove formulazioni

L'Università di Camerino ha condotto alcune ricerche preliminari, sia a livello di documentazione che dal punto di vista strumentale, per la realizzazione e test di SSFC (Semi-Solid Flow Cell) basate su anodi di titanato di litio (LTO, $Li_4Ti_5O_{12}$) e TiO_2 [rapporto RdS/PAR2013/187]. I risultati ottenuti dimostrano che questo tipo di celle sono fattibili, ma che, sia a livello di cella sperimentale che di formulazione delle sospensioni, i problemi da superare richiedono ulteriori approfondimenti.

Questa indagine è stata spinta dalla necessità di risolvere i principali problemi delle redox Vanadio/Vanadio che, come già accennato, sono essenzialmente: (i) operazione in ambiente acquoso con i conseguenti limiti dovuti alla limitata finestra di stabilità elettrochimica; (ii) solubilità delle coppie redox (1,5-2 M per la cella Vanadio/Vanadio) che limita l'energia specifica e (iii) costi, selettività e stabilità delle membrane necessarie per separare i compartimenti, anodico e catodico, per evitare il contatto diretto dei reattivi.

In questo contesto sono stati proposti diversi approcci, tra cui quello di utilizzare elettroliti contenenti particelle elettroattive costituite da composti utilizzati in batterie al litio-ione classiche (LTO, LFP, etc.) sospese in un elettrolita contenente ioni litio. In particolare, il lavoro svolto dall'Università di Camerino, ancora preliminare, ha riguardato le modalità di preparazione delle sospensioni e la preparazione e costruzione della cella sperimentale e l'effettuazione di prove sperimentali.

La preparazione delle sospensioni è una fase molto delicata, in quanto è necessario ottimizzare le quantità relative dei vari componenti per ottenere un fluido con proprietà ottimali di aggregazione e avente la minore resistenza elettrica possibile. In pratica si è proceduto i due modi:

1. mescolamento meccanico dei componenti secchi all'interno del dry-box, utilizzando un omogeneizzatore (IKA Werke Staufen, D) munito di palline di vetro, operato per tre ore con step da dieci minuti alla velocità di 4 rpm aggiungendo progressivamente l'elettrolita. Alla fine del processo la sospensione appare omogenea, ma presenta una spiccata tendenza alla precipitazione del materiale attivo;
2. mescolamento dei componenti a secco in mortaio per trenta minuti, trattamento in mulino a palle per tre ore a 500 rpm con 20 palline di agata e successivo essiccamento sotto vuoto per una notte. In dry-box la miscela secca viene addizionata con l'elettrolita e posta sotto agitazione per due ore.

Sono state preparate due tipi di sospensione con le seguenti composizioni:

a) $LiFePO_4$ + Ketjen black EC 300J + EC-DMC (1:1) 1 M $LiPF_6$ 26:0,8:73,2 % in volume
b) $Li_4Ti_5O_{12}$ + Ketjen black EC 300J + EC-DMC (1:1) 1 M $LiPF_6$ 15,56:2,04:82,4 % in volume.

Nel sistema di prova si può utilizzare con lo stesso tipo di cella adottata per lo studio delle celle litio-ione classiche. Gli elettrodi solidi sono sostituiti con uno strato sottile di sospensione a diretto contatto con il separatore utilizzando litio metallico come contro-elettrodo ove si voglia studiare un solo componente (anodo o catodo). Una cella di questo tipo è mostrata in Figura 37.

La cella E-cell è commerciale. Sulla cella sono stati eseguiti cicli di carica e scarica, che hanno mostrato che la capacità diminuisce progressivamente per un'apparente perdita di materiale attivo che in realtà corrisponde ad una separazione delle particelle attive ed ad un non ottimale funzionamento del network conduttivo. L'esperimento dimostra che il sistema funziona e che richiede un ulteriore lavoro di ottimizzazione sia sulla formulazione della sospensione che sui metodi di preparazione della stessa che, nel caso in oggetto è stata effettuata per semplice mescolamento dei componenti solidi nel solvente e successiva agitazione.

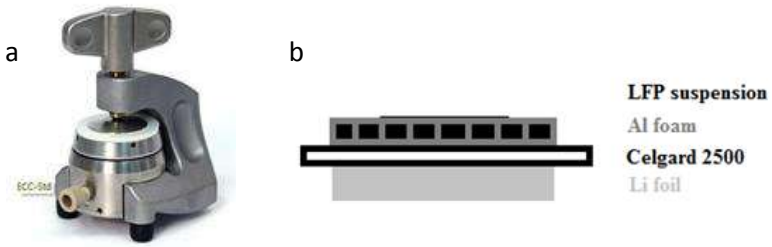


Figura 37. (a) Cella tipo E-Cell, (b) Sistemazione interna stack elettrodi

La Figura 38 mostra i singoli componenti della cella a flusso. Le sospensioni, preparate in dry-box, arrivano ed escono dai compartimenti a e b attraverso i fori praticati nei collettori e piatti (c,d) di teflon. Lo spessore del teflon con cui sono costruiti i compartimenti a e b è dell'ordine di 0,5 mm. Questo corrisponde al cammino massimo che devono percorrere gli elettroni per raggiungere i collettori. La cella assemblata (Figura 39) è collegata alla pompa peristaltica. I collettori di corrente sono in Al per il catodo e Cu per l'anodo.

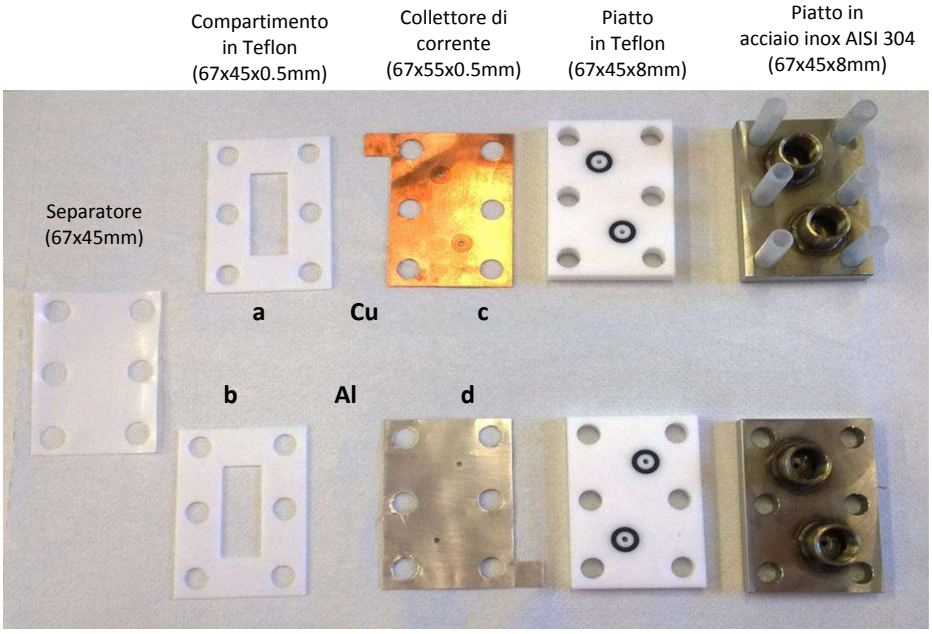


Figura 38. Componenti della cella singola

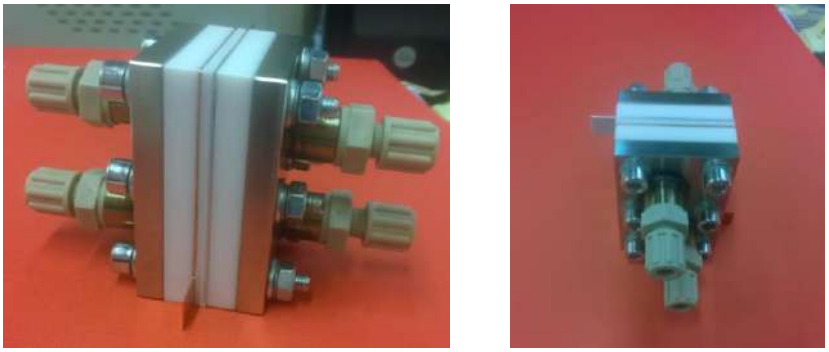


Figura 39. Cella assemblata

La cella può essere facilmente adattata per utilizzare litio metallico come secondo elettrodo per studiare il comportamento di un composto catodico o anodico. In questo caso nella cavità (a) alloggia litio metallico, il collettore di corrente di Cu è sostituito da acciaio e la piastra di teflon (c) non presenta fori passanti. La cella è assemblata in dry-box e chiusa collegando i tubi di andata e ritorno delle pompe peristaltiche al contenitore delle

sospensioni. In questo modo si impedisce ogni contatto delle sospensioni con l'atmosfera quando il tutto è rimosso dal dry-box e operato all'esterno.

Dalle curve di carica e scarica galvanostatiche, riportate in Figura 40, si ottengono le prime informazioni sul funzionamento della cella. La prima scarica si esaurisce per raggiungimento del potenziale di cut-off, quando solo il 50% del contenuto di composto attivo è stato ridotto. Per questa ragione nel seguente/i ciclo/i di carica è raggiunto il potenziale di cut-off superiore dopo che sono passati pochi mAh. La perdita di capacità è progressiva nei cicli successivi.

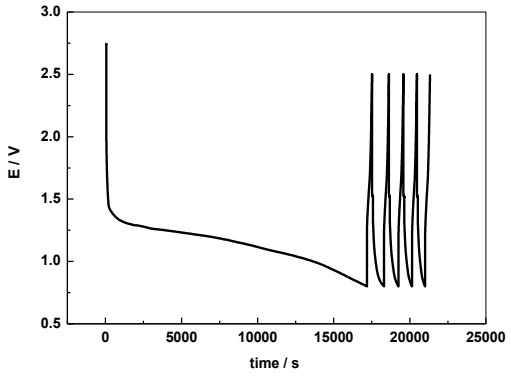


Figura 40. Curve di carica e scarica galvanostatiche. Densità di corrente 0,4 mA cm^{-2}

I risultati ottenuti dimostrano che il sistema è molto promettente e fattibile. Le aree che necessitano di ulteriori miglioramenti sono quelle relative a:

a. metodi di preparazione delle sospensioni (composizione e metodologie di preparazione)
b. caratterizzazione delle proprietà elettriche e reologiche delle sospensioni
c. ottimizzazione della geometria della cella singola ed introduzione nella stessa di collettori di corrente ad elevata area superficiale.

Realizzazione e prova di celle redox Vanadio/Vanadio

La ridotta attività elettrochimica e la scarsa reversibilità cinetica degli elettrodi di grafite o a base di carbone sono state identificate come i principali fattori che limitano l'utilizzo delle batterie al vanadio. Una limitata letteratura sull'argomento ha reso necessario effettuare uno studio preliminare per verificare i materiali più idonei all'utilizzo nelle batterie redox al vanadio (VRB). Le attività ENEA si sono focalizzate su alcuni problemi relativi alla stabilità ed alle prestazioni elettrochimiche di materiali elettrodici per VRB [rapporto RdS/PAR2013/186]. In particolare, è stata effettuata una caratterizzazione chimico-fisica su diversi materiali a base di grafite allo scopo di valutare il materiale elettrodico più idoneo a lavorare nelle condizioni operative tipiche delle VRB. L'attività sperimentale si è concentrata sulla cinetica della reazione di ossidazione/riduzione dello ione vanadio.

I materiali testati nel corso della sperimentazione sono elencati nella Tabella 11. Si tratta di materiali a base di carbone di uso comune nelle celle a combustibile polimerico, dove vengono impiegati come supporti per la preparazione di elettrodi a diffusione gassosa. I materiali sono tutti caratterizzati da un'elevata porosità ed una ottima conducibilità elettrica. Fanno eccezione il glassy carbon (una grafite vetrosa pura) che è stata inserita quale materiale di riferimento ed il carburo di silicio non utilizzato nelle celle a combustibile ma potenzialmente interessante.

Tabella 11. Materiali elettrodici e caratteristiche chimico fisiche

Materiale	Produttore	Spessore, mm	Porosità, %	Conducibilità, Ω cm
Glassy Carbon	HTW	2.00	0	-
Carbon Paper (CP) – TGP-H090	Toray	0.28	74	1.11
Carbon Cloth - Etek	Fuel Cells-Etc	0.41	75	0.55
Carbon Paper (BC-31)*	SGL	0.26	82	1.55
SiC	FN	0.21	41	2.00

*contiene il 5% di Teflon

La Figura 41 mostra le microfotografie dei materiali utilizzati nella sperimentazione Si tratta di materiali costituiti da fibre di carbone con struttura fibrosa ordinata o disordinata che conferiscono elevata porosità ed alta superficie specifica. Come si può osservare dai dati di Tabella 11, tutti i materiali sono caratterizzati da un'elevata conducibilità elettrica. Le misure di impedenza effettuate sui diversi supporti in acido solforico 1 M non hanno mostrato differenze marcate, evidenziando un comportamento tipico dei materiali conduttori di prima specie, con una resistenza ohmica di circa 1,5÷2,0 Ω.

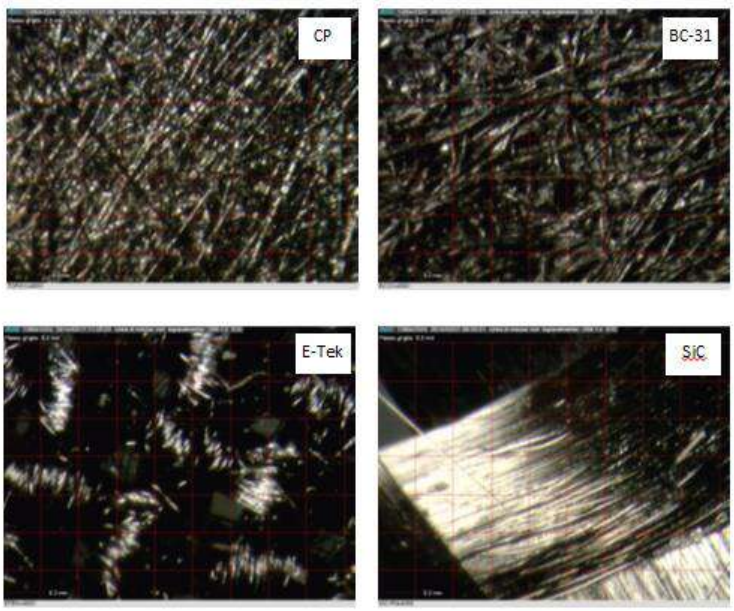


Figura 41. Fotografie dei materiali carboniosi utilizzati come elettrodi

Sui diversi campioni sono state eseguite misure per determinare l'attività elettrocatalitica nei confronti dello ione V^{4+} allo scopo di operare una selezione tra i materiali in studio. Le prove effettuate hanno evidenziato che il materiale elettrodico più idoneo tra quelli analizzati era il carbon paper tal quale.

Si è quindi provveduto ad effettuare ad una campagna di misure su cella utilizzando come materiale elettrodico il CP-Toray. La Figura 42 riporta lo spettro di impedenza ottenuto su una VRB in flusso di H_2SO_4 1 M (50 mL min^{-1}). La resistenza della cella è stata calcolata pari a R=1,15 Ωcm^2.

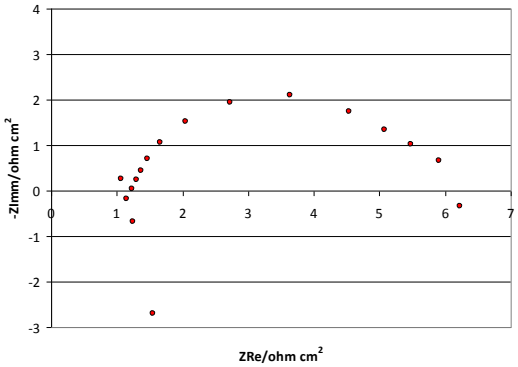


Figura 42. Spettro di impedenza di una cella VRB in flusso di acido solforico

Durante molti cicli consecutivi di carica e scarica a cui è stata sottoposta una cella di prova, assemblata utilizzando carbon paper Toray e una membrana di Nafion™ 115, si è osservato che la quantità di corrente caricata o scaricata si riduce ad ogni ciclo, mentre il rapporto tende ad un valore costante pari al 26%. Dopo aver effettuato 100 cicli

consecutivi si misurava l'impedenza e si continuava a misurarla lavando la cella con un flusso di acido solforico 1 M.

Al termine delle prove elettrochimiche, la cella è stata aperta per visionare lo stato dei componenti. Si evidenziava erosione degli elettrodi in carbon paper, in particolare nei punti di ingresso e uscita delle soluzioni provenienti dai serbatoi (Figura 43), e la presenza di effetti di degradazione anche sulla membrana polimerica, ma la loro entità non è stata ancora analizzata in dettaglio.

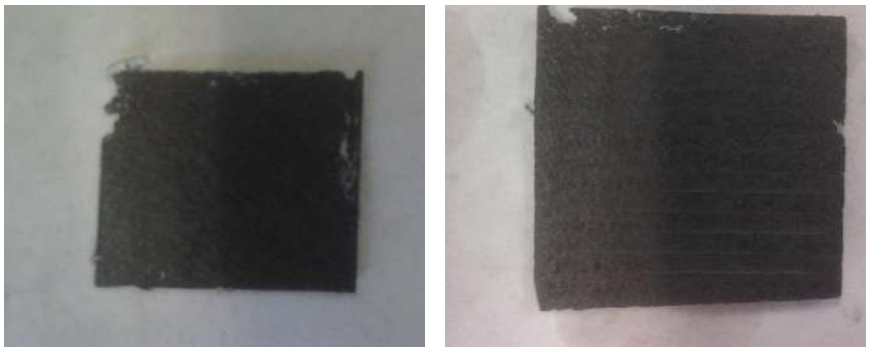


Figura 43. . Elettrodi di carbon paper CP dopo prolungati cicli di carica/scarica

In conclusione, dalle prove effettuate nella presente annualità è risultato che il materiale elettrodico utilizzato (BC31- SGL) è assolutamente non idoneo per l'impiego in celle VRB in quanto le cinetiche di ossidazione e riduzione del vanadio su questo tipo di carbone sono pessime. Uno screening effettuato su diversi materiali a base di grafite ha dimostrato che benché tutti i materiali utilizzati siano da un punto di vista elettrico simili tra loro con elevata conducibilità e porosità tuttavia, le loro prestazioni in rapporto alla reazione caratteristica di una cella redox al vanadio sono molto diverse.

Le misure in cella hanno evidenziato una serie di problemi che influenzano le prestazioni della VRB:

- la capacità specifica diminuisce ad ogni ciclo
- lo ione V(III) viene assorbito dalla membrana aumentando la resistenza e quindi la caduta ohmica della cella
- la riduzione del V(III) a V(II) è ostacolata dall'evoluzione di idrogeno
- il carbon paper della Toray è il materiale elettrodico che ha fornito le prestazioni migliori tuttavia nelle condizioni aggressive della VRB è stata osservata una degradazione evidente
- ia membrana polimerica subisce anch'essa una degradazione che è necessario valutare.

c. Analisi sperimentali, di identificazione di cicli rappresentativi e di sicurezza di sistemi di accumulo elettrochimico

L'utilizzazione dei sistemi di accumulo elettrochimico nelle reti elettriche richiede una continua ed attenta analisi delle effettive modalità operative (per ottimizzarne l'uso, le dimensioni ed il costo), dei costi ad essi associati, che devono essere assolutamente ridotti ed ottimizzati, e degli eventuali aspetti di sicurezza durante le varie fasi di acquisizione, trasporto, ed utilizzo (in questo obiettivo non vengono considerate le possibilità di smaltimento e riciclo dei materiali, previste nell'obiettivo d).

Per proseguire l'acquisizione di dati di effettiva funzionalità e di cicli di funzionamento di sistemi di accumulo commerciali, era previsto lo studio e la progettazione preliminare dell'introduzione di un sistema di accumulo stazionario in una metropolitana di superficie. L'obiettivo era quello di sviluppare i micro-cicli di funzionamento, individuati in precedenza mediante modello, per poter poi essere in grado di valutare sperimentalmente con prove di laboratorio su celle commerciali i profili di potenza ed energia richiesti alla rete elettrica di alimentazione della metro ed individuare un punto soggetto a notevoli variazioni di potenza, dovute alle fasi di accelerazione e di frenatura dei mezzi, dove maggiore è ritenuto il vantaggio ottenibile dall'introduzione di un accumulo, sostenendone anche la scelta ed il dimensionamento (batterie o supercondensatori).

Altre attività dell'obiettivo hanno riguardato la valutazione sperimentale della "second life" e del comportamento termico di celle a litio, eseguite su campioni parzialmente usati, sulla base dei profili caratteristici in alcune

applicazioni tipiche per le reti elettriche. È inoltre stata estesa l'attività sull'analisi della sicurezza nelle varie condizioni di produzione ed uso di batterie diverse da quelle al litio (batterie ad alta temperatura).

Alle attività hanno partecipato diverse unità ENEA e l'Università di Pisa.

c.1 Identificazione di cicli rappresentativi

Nella precedente annualità era stata svolta un'attività volta alla definizione delle 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, del tipo di quella operativa nella città di Bergamo; la simulazione della struttura elettrica della tranvia e dei tram, nonché la gestione della movimentazione tramite le effettive tracce orarie; la definizione di logica di gestione dello stato di carica degli accumulatori e un criterio di dimensionamento della capacità energetica di accumulo. Il passo successivo è stato quello di determinare sperimentalmente i cicli rappresentativi di uso delle batterie e di validare il modello di funzionamento proposto con prove di laboratorio. Non è inclusa in quest'attività la realizzazione dell'intero sistema e dell'integrazione del sistema, ma soltanto la partecipazione alla campagna di prove dopo adeguate allestimento strumentale, fatto dalle aziende ed organizzazioni coinvolte, e le successive prove di laboratorio su celle di accumulo commerciali utilizzando i cicli rappresentativi.

Campagna sperimentali e dimensionamento di massima del sistema di accumulo

L'attività, svolta dall'Università di Pisa[rapporto RdS/PAR2013/188], è stata orientata all'identificazione del ciclo di potenza assorbita e al dimensionamento di uno più sistemi di accumulo da installare sull'alimentazione di una tranvia per il risparmio energetico ed il servizio di "demand-response" per la rete di distribuzione in media tensione. Era inoltre previsto lo studio e la successiva installazione di un sistema di misura per l'individuazione degli assorbimenti energetici delle sottostazioni di alimentazione delle linee di contatto. L'attività è stata così strutturata:

- mediante il modello di simulazione della tranvia (sviluppato nell'ambito dell'attività di Ricerca di Sistema 2012) sono state effettuate nuove simulazioni orientate all'affinamento della soluzione proposta;
- sulla base dei risultati è stata definita una campagna di misure sperimentali da effettuare sulla rete, per validare lo strumento di simulazione. Attraverso il programma di simulazione validato, sono state stimate le sollecitazioni cui sono sottoposti i sistemi di accumulo;
- si è proceduto quindi al dimensionamento dei sistemi di accumulo e sono state condotte analisi economiche.

Partendo dal modello già realizzato per una tramvia semplificata composta da un numero prefissato di sottostazioni di alimentazione e tram in transito, sono state svolte diverse simulazioni con specifico riferimento alla tramvia collocata a Bergamo. La lunghezza totale della linea è approssimativamente di 12 km, ed è composta da 10 sottostazioni (SSE). Il numero di tram è variabile rispetto all'ora considerata, che può essere di punta (10 tram in transito), di morbida (5 tram), festiva (3 tram).

Le simulazioni sono state ripetute considerando il mix annuale di giornate scolastiche, non scolastiche e festive, ciascuna caratterizzata da una diversa combinazione di ore. Le simulazioni sono state ripetute al fine di affinare i risultati ottenuti nella precedente annualità, in particolare:

- verificare l'effetto del risparmio di energia legato all'installazione di più sistemi di accumulo in corrispondenza delle SSE;
- analizzare l'effetto della presenza del convertitore DC/DC sui risparmi conseguiti;
- valutare l'effetto della strategia di controllo del recupero dell'energia in frenatura sui risparmi conseguiti.

Se nessun sistema di accumulo è installato lungo la linea di alimentazione, un tram può effettivamente recuperare l'energia di frenatura solo quando sono presenti altri tram nelle sue vicinanze in grado di assorbirla. Appare dunque lecito aspettarsi che quando sono installati lungo la linea uno o più sistemi di accumulo, il recupero energetico in frenatura sia incrementato. L'accumulo, infatti, anche in assenza di richiesta di potenza degli altri tram sulla rete, può immagazzinare suddetta energia per rilasciarla successivamente, quando le richieste da parte del carico aumentano. Diverse sono le tipologie di accumulo che possono essere considerate:

- sistemi basati su supercondensatori interfacciati con la rete attraverso convertitori DC/DC;
- sistemi basati su batterie al litio ad alta potenza interfacciati alla rete attraverso convertitori DC/DC;
- sistemi basati su batterie al litio ad alta potenza direttamente connessi alla rete.

Poiché i tempi di arresto sono nell'ordine dei 10-20 s, la soluzione più frequentemente conosciuta si basava sull'utilizzo di supercondensatori, che richiedono tra l'altro in via obbligatoria la presenza di un convertitore DC/DC a causa delle notevoli variazioni di tensione in un ciclo completo di carica/scarica.

Tuttavia negli ultimi anni le batterie al litio ad alta potenza sono diventate sempre più adatte all'utilizzo in applicazioni orientate alle alte potenze, e appaiono dunque una soluzione di grande interesse. La prima investigazione si è orientata alla soluzione più semplice, in cui l'accumulo è direttamente connesso alla rete. Il numero di celle deve essere scelto in maniera tale che quando la linea di contatto è al valore di tensione nominale lo stato di carica si posiziona su un livello intermedio. Le caratteristiche della batteria scelta sono riportate in Tabella 12.

Dalle simulazioni risulta che il picco di corrente ottenuto nel caso peggiore, corrispondente al configurazione di punta (10 tram) con un singolo sistema di accumulo installato, sono quelli mostrati in Figura 44 ed appaiono compatibili con le caratteristiche della cella. Lo stato di carica rimane stabile attorno al 55%, con oscillazioni durante i profili di carica-scarica attorno al 4% nel caso di punta, del 1-2% nel caso di morbida o festivo.

Tabella 12. Caratteristiche della batteria

Numero di celle	220
Tensione nominale di cella (V)	3.7
Tensione nominale (V)	814
Capacità nominale (Ah)	100
Corrente massima (A/Ah)	10
Energia nominale (kWh)	81.4

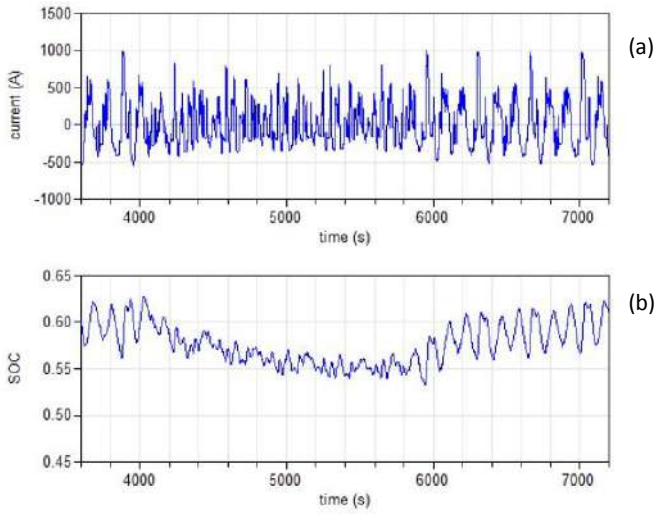


Figura 44. Corrente di batteria (a) e SOC (b) in corrispondenza di un'ora di punta

I risparmi sull'energia erogata dalle SSE, riportati in Tabella 13, sono stati valutati in condizioni di seguito elencate:

- i tram dissipano tutta l'energia di frenatura sui resistori di bordo (caso A).
- i tram mandano l'energia di frenatura sulla linea, finché quest'ultima non raggiunge il valore massimo di 900 V (caso B).
- come per il caso B, ma con l'aggiunta di *n* dispositivi di accumulo dalle caratteristiche prima menzionate, installati in corrispondenza delle SSE (casi C-*n*).

Tabella 13. Energia erogata SSE in funzione del numero di accumuli installato

Caso	Energia totale erogata SSE (MWh/anno)	Risparmio energetico (MWh/anno)
A	3100	-
B	**2869**	**0**
C-1	2612	257
C-2	2397	472
C-3	2049	820
C-4	1820	1049
C-5	1769	1100
C-10	1641	1228

Come si può osservare, il risparmio energetico cresce spostandosi dalla configurazione ad accumulo singolo fino a quella dotata di quattro accumuli. Al contrario, per un numero di accumuli più elevato, il livello del risparmio energetico tende a saturare verso un limite superiore. Le simulazioni sono state estese anche alle batterie al litio con collegamento tramite convertitori.

La campagna sperimentale è stata rivolta ad acquisire i dati di funzionamento della tranvia per poter validare il modello sviluppato. Il sistema di misura installato lungo il percorso si caratterizza per l'utilizzo di diversi strumenti. Tutte le sottostazioni sono equipaggiate con un contatore, al fine di valutare i consumi energetici in media tensione MT (15 kV). In aggiunta è stato installato un secondo contatore, per misurare i consumi energetici dei dispositivi ausiliari di stazione in bassa tensione BT. Questi ultimi includono lampade, segnali visivi e acustici installati nella SSE in esame e nella più vicina stazione. In un numero più ristretto di SSE è stato installato anche un data logger per la misura di tensione e corrente. Tutti gli strumenti sono stati sincronizzati, al fine di evitare disallineamenti tra le registrazioni effettuate. Il posizionamento degli strumenti all'interno di una singola sottostazione è mostrato schematicamente in Figura 45.

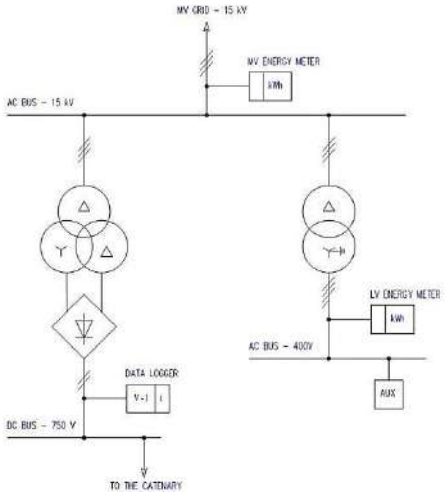


Figura 45. Posizionamento degli strumenti in una singola sottostazione

A partire dalle misure effettuate è stata fatta un valutazione delle perdite energetiche di ciascuna sottostazione e dell'energia richiesta dai tram durante diverse condizioni operative (ore di punta, ore di basso carico e giorni festivi). In particolare, dalle tre sottostazioni completamente strumentate sono stati estrapolati trend anche per le altre SSE e confrontati con le misure disponibili, in particolare quelle in bassa e media tensione rilevate dai contatori. A corredo delle informazioni disponibili sono stati utilizzati anche i consumi in media tensione MT degli ultimi tre anni forniti dall'operatore della linea.

In Tabella 14, a titolo esemplificativo, riporta alcuni flussi energetici misurati in tre SSE.

Tabella 14. Flussi energetici per tre SSE

SSE	Energia Giornaliera MT (kWh)	Energia Ausiliari BT (%)*	Perdite SSE (%)*	Energia di trazione (%)*
giorno scolastico				
San Fermo	1231	16.3	18.4	65.3
Alzano	882	22.3	22.4	55.3
Albino	1167	10.8	18.5	70.7
giorno non scolastico				
San Fermo	1097	18.3	20.1	61.6
Alzano	636	25.9	24.1	50.0
Albino	966	13.0	21.4	65.6
giorno festivo				
San Fermo	787	25.5	26.0	48.5
Alzano	614	32.0	30.0	38.0
Albino	689	18.2	27.9	53.8

* percentuale relativa alla corrispondente energia giornaliera in MT.

La validazione del modello è stata effettuata prendendo a riferimento un tipico giorno di utilizzo. A questo riguardo è stato scelto un giorno lavorativo non scolastico, composto da 17 ore di morbida. L'energia richiesta dai tram è stata valutata dalle misure in MT ridotte dalle perdite e dall'alimentazione dei carichi in BT. Va comunque precisato che i valori indicati includono i servizi ausiliari a bordo tram, come il riscaldamento e la climatizzazione. In Tabella 15 si riporta l'energia erogata dalle SSE misurata e simulata.

Tabella 15. Energia erogata dalle SSE, misurata e simulata

SSE	Energia misurata (kWh)	Energia simulata (kWh)
David	1126,7	1121,5
S. Pellico	298,4	362,2
Alzano M.	496,6	407,5
Nembro C.	389,4	383,0
Pradalungo	412,7	447,2
S. Fermo	954,7	999,2
Deposito	1753,6	1752,5
Alzano S.	661,6	553,9
Nembro S.	345,7	441,1
Albino	877,1	801,8

I parametri del modello utilizzati per la validazione sono stati scelti in base ai seguenti criteri:

- i valori di tensione a vuoto e resistenza, sulla base dei criteri precedentemente menzionati, sono stati aumentati. Le differenze tra SSE è nel range ± 5 V e ± 0,005 Ω;
- ia strategia di recupero dell'energia di frenatura è stata adeguata sulla base delle acquisizioni del data logger. In particolare, il limite di tensione oltre il quale l'energia viene dissipata sui resistori è stato innalzato a 960 V, rispetto ai 900 V di progetto;
- il consumo degli ausiliari è stato fissato a 2 kW, per via del ridotto assorbimento di riscaldamento e condizionamento durante le prove sperimentali;
- il profilo di velocità è stato aggiornato, visto che in larga parte del percorso l'effettiva massima velocità misurata di 50 km/h è più bassa del valore fornito dall'operatore, rispettivamente pari a 70 km/h. Progettazione del sistema di accumulo.

Progettazione del sistema si accumulo

Per scelta progettuale, la soluzione preferenziale è basata sull'uso di accumulatori al litio che possono essere utilizzati con o senza interposizione del convertitore DC/DC. Sebbene la presenza di un componente addizionale può risultare poco vantaggiosa in termini di spazio occupato e complessità per l'intero sistema, l'introduzione del DC/DC garantisce in primo luogo di mantenere lo stato di carica dell'accumulo a un dato riferimento. In più, garantisce molta più flessibilità nel dimensionamento dell'accumulo stesso, essendo la tensione di batteria non direttamente vincolata alla tensione operativa della linea. In conclusione, la corrente di batteria può così essere limitata a un valore di sicurezza.

Tabella 16. Parametri dell'accumulo

Numero di celle	190
Tensione nominale di cella (V)	3,2
Tensione nominale (V)	608
Capacità nominale (Ah)	160
Corrente massima (A/Ah)	6
Energia nominale (kWh)	97,3

Il dimensionamento è stato effettuato, mediante il modello sviluppato, tenendo conto della massima potenza ottenibile, al fine di consentire il recupero del maggior quantitativo possibile di energia di frenatura. A questo proposito, le celle al litio selezionate sono state valutate proprio in funzione della massima corrente di carica e scarica ammesse. I parametri dell'accumulo selezionato sono riportati in Tabella 16. Come osservabile, la configurazione prevista non è variata rispetto a quella definita nella fase di simulazione del modello non validato.

Per quanto riguarda la vita della cella, delle simulazioni risulta che lo stato di carica rimane piuttosto stabile, con una oscillazione massima in termini di SOC attorno al 4%. Pur in assenza di evidenze in letteratura, esperienze effettuate e alcuni dati forniti dal costruttore hanno mostrato che la vita della batteria sottoposta a questo tipo di utilizzo può raggiungere il milione di cicli, consentendo così alla batteria di raggiungere la vita utile dell'impianto, stimata in 15-20 anni.

I risparmi di energia erogata dalle SSE sono mostrati in Tabella 17 e riferiti allo scenario Base, nel quale i tram inviano l'energia di frenatura lungo la catenaria finché la tensione massima non raggiunge il valore di 960 V. In particolare, sono state analizzate le configurazioni dotate di uno o tre accumuli, installati in corrispondenza delle SSE situate lungo il percorso. Il numero massimo di accumuli da considerare è stato posto pari a 3 in funzione del

trend osservato, che mostra come il risparmio di energia sale passando da 1 a 3 accumuli, mentre per un numero di accumuli più elevato il livello di energia tende a saturare verso un limite superiore.

Tabella 17. Energia totale erogata dalle SSE per diverse configurazioni dell'accumulo

Caso studio	Energia totale SSE (MWh/anno)	Risparmio energetico (MWh/anno)
Base	2994	-
1-Storage	2787	207
3-Storage	2250	744

Questi risultati mostrano una riduzione in termini di energia erogata dalle SSE tra lo scenario considerato e quello di riferimento, rispettivamente, pari al 7 e 25%. Si osservi infine che quest'ultimo appare non così lontano da quello ottenuto nelle analisi precedenti e riportato in precedenza, a conferma del trend già menzionato.

Considerazioni economiche

Lo scenario considerato si riferisce a compagnie di trasporto pubbliche e private desiderose di aggiornare i loro impianti, ma con attenzione agli aspetti economici e finanziari. L'analisi costi/benefici effettuata considera dunque l'investimento iniziale e i flussi di cassa annuali di ritorno dell'investimento legati al risparmio di energia erogata dalle SSE. L'investimento iniziale, che include i sistemi di accumulo, i convertitori di potenza e le spese generali di impianto, è stato calcolato in accordo alla seguente espressione:

$$C_i = P_{PC}C_{PC} + E_{RESS}C_{RESS}$$

dove E_{RESS} e C_{RESS} rappresentano, rispettivamente, l'energia nominale dell'accumulo e il suo costo unitario. Va comunque precisato che sono stati utilizzati valori diversi per C_{RESS}, da 300 €/kWh a 600 €/kWh. D'altra parte, indicano la massima potenza gestibile dal convertitore di potenza e il suo costo unitario, includendo la spesa di impianto. A questo proposito si è considerato un valore costante pari a 200 €/kW.

Bisogna comunque precisare che E_{RESS} è stata determinata con l'obiettivo di mantenere le celle al litio internamente ai loro limiti di potenza, essendo il loro unico compito quello di gestire elevate correnti in carica e scarica per brevi intervalli di tempo. L'espressione precedente, sotto l'ipotesi che la massima potenza gestibile dall'accumulo sia uguale a quella del convertitore primario (dunque P_{RESS}=P_{PC}) può dunque modificarsi come segue:

$$C_i = P_{PC}\left(C_{PC} + \frac{C_{RESS}}{k_B}\right)$$

$$k_B = \frac{P_{RESS}}{E_{RESS}}$$

dove k_B è il rapporto tra la massima potenza gestita dall'accumulo e la sua energia nominale. Più grande è il rapporto, maggiore la prestazione garantita. In aggiunta k_B è esprimibile in funzione di C_{RESS}, corrispondendo a celle con maggiori prestazioni prezzi più alti. Per l'applicazione in esame, sono stati scelti in particolare due valori, uguali rispettivamente a 3 e 6 h^{-1}, corrispondenti a un costo di 300 €/kWh (celle economiche LFP) e 500 €/kWh (celle ad alta potenza NMC) ricavati da esperienze precedenti.

Anche per quanto riguarda il costo dell'energia sono stati utilizzati diversi valori, da 50 €/MWh fino a 150 €/MWh, al fine di considerare la variabilità del mercato dell'energia globale. Principali obiettivi sono stati quello di calcolare il tempo di rientro dell'investimento (PBT) e il valore netto dell'investimento (NPV) per una vita complessiva dell'impianto di 15 anni e un interesse del 6%, nel caso di un singolo o tre sistemi di accumulo installati. I risultati sono riportati nelle Tabelle 18 e 19.

Tabella 18. NPV e PBT, accumulo singolo

		P_E (€/MWh)		
		50	100	150
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	NPV (k€)		
300	3	-64	36	137
500	6	-55	45	146
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	PBT (y)		
300	3	>15	10.8	6.1
500	6	>15	9.9	5.7

Tabella 19.NPV e PBT, tre accumuli

		P_E (€/MWh)		
		50	100	150
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	NPV (k€)		
300	3	-134	228	589
500	6	-106	255	616
C_{RESS} (€/kWh)	k_B (1/h)	PBT (y)		
300	3	>15	8.3	4.9
500	6	>15	7.6	4.5

Come è possibile osservare il tempo di ritorno più breve si ha attorno ai 6 anni per la configurazione ad accumulo singolo, e verso i 4,5 anni per la configurazione con tre accumuli. L'ultima soluzione appare in particolare più interessante in termini di NPV, con 616 k€ al termine dei 15 anni. Per questi motivi, la configurazione con tre accumuli sembra la più efficace in termini di convenienza economica tra tutti i casi esaminati.

Ciclo di prova per test simulati del sistema di accumulo

L'attività dell'ENEA si è concentrata sullo sviluppo di un ciclo di test per eseguire prove di vita su sistemi di accumulo elettrochimico: in particolare la procedura permette, partendo da un qualsiasi profilo temporale di corrente di batteria, di crearne uno ad esso equivalente in termini di profondità di scarica, valori di picco e dissipazione termica sulle resistenze.

Il ciclo è costituito da soli gradini, è quindi facilmente utilizzabile con le attrezzature (ciclatori programmabili) disponibili in laboratorio, può essere caratterizzato con semplicità ed può essere associato ad una 'classe' di cicli test aventi la stessa struttura e caratteristiche simili. Gli attuali ciclatori (o i sistemi accoppiati alimentatore/carico elettronico), sono apparecchiature che possono imporre una corrente da erogare/assorbire alle batterie): in genere queste sistemi sono pensate per seguire dei profili di corrente/potenza/tensione caratterizzati da variazioni a gradino della stesse o, al contrario, eseguono variazioni continue ma con una dinamica lenta (es. ricarica a tensione costante). Solo alcuni ciclatori, tra quelli più evoluti e costosi, dispongono di una funzione che accetta in ingresso un profilo temporale di corrente o potenza comunque variabile (all'interno di precisi limiti di campionamento e di variazione dinamica della potenza e/o corrente) per riprodurlo in un test specifico.

L'obiettivo dell'attività svolta è stato quello di proporre una procedura di costruzione del ciclo di test con validità del tutto generale e facilmente utilizzabile in tutti i ciclatori programmabili. Comunque per la sua validazione, l'attività è stata finalizzata al sistema di accumulo utilizzato per la metropolitana di Bergamo, in modo da definire il ciclo di prova con una verifica sperimentale preliminare di laboratorio.

Sulla base delle misure fatte sulla metropolitana di Bergamo, per una intera giornata di esercizio della linea si evince che gli andamenti esaminati alle varie SSE di tensione, corrente, energia e potenza sono simili ma non equivalenti fra di loro: infatti per la SSE 4 c'è una piccola differenza con le altre sottostazioni in termini di corrente massima erogata e variazione dello stato di carica.

Per stimare il tempo di vita dell'accumulo in questa applicazione tramite un test di vita è necessario considerare il complesso dei tre cicli di lavoro e costruirne uno che massimizzi le sollecitazioni a cui le batterie sono sottoposte da ognuno di essi, quindi un ciclo di prova dovrà presentare:

1. lo stesso numero di picchi di corrente a cui sono sottoposte le batterie o un numero maggiore
2. la corrente massima uguale o superiore alla massima erogata dalle batterie
3. la stessa variazione di stato di carica o una maggiore
4. la stessa potenza dissipata o una maggiore.

Il ciclo che si propone è costituito da una serie di scariche e cariche a gradino, costruite in modo da rappresentare delle correnti di picco ed una corrente continuativa di carica/scarica (Figura 46).

Le correnti di picco rappresentano la parte di potenza del ciclo originale, mentre la continuativa viene utilizzata per far variare lo stato di carica delle celle: il ciclo può essere ripetuto periodicamente in quanto lo stato di carica iniziale e finale della batteria coincidono tra di loro.

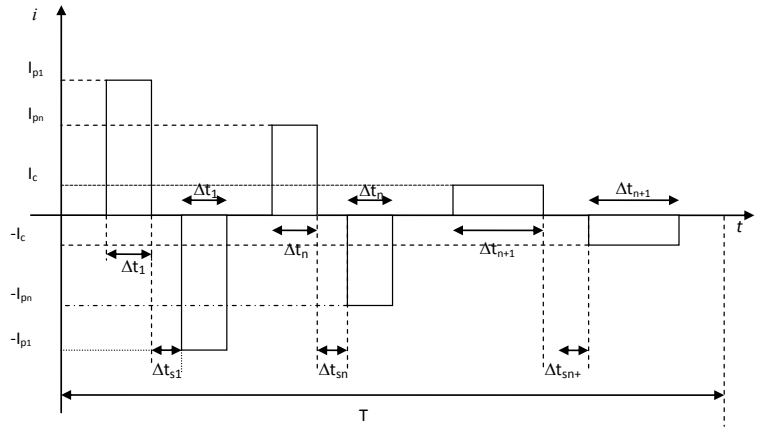


Figura 46. Struttura base del ciclo di riferimento

La Figura 47 rappresenta il ciclo, sviluppato analizzando accuratamente i vari profili misurati e facendo diverse ipotesi semplificatrici.

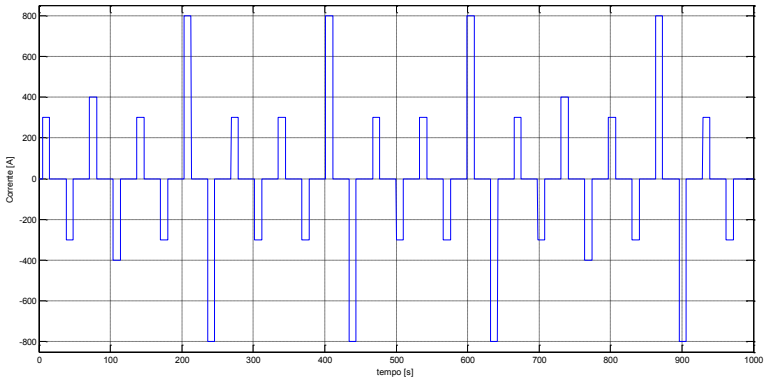


Figura 47. Ciclo di riferimento

La Figura 48 permette di confrontare il ciclo di prova con l'andamento della corrente della SSE 4, che tra le tre sottostazioni è quella che presenta la maggiore erogazione e dispersione di energia.

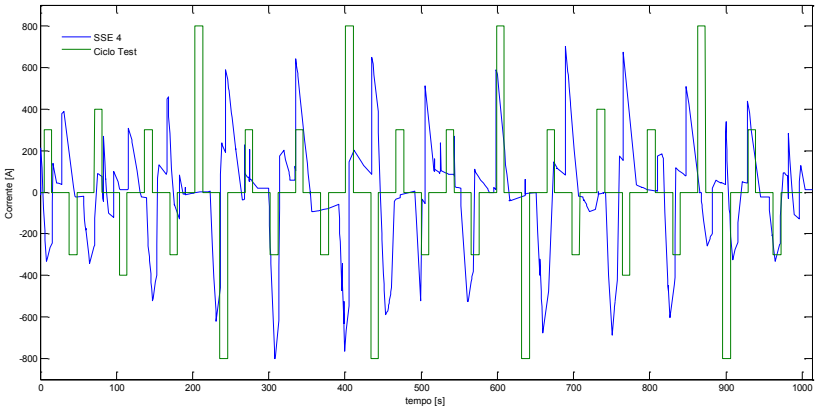


Figura 48. Confronto tra il ciclo test e l'andamento di corrente della SSE 4

Il ciclo di test sviluppato è adatto a fornire una stima della vita operativa delle batterie, stima che sarà conservativa rispetto alla realtà: esso infatti costituisce una maggiorazione delle sollecitazioni imposte alle batterie.

In sintesi la procedura seguita è stata la seguente:

1) si individua un periodo T del ciclo o pseudo ciclo reale di lavoro
2) si calcola la variazione di stato di carica tra inizio e fine del periodo individuato
3) si identificano i picchi di corrente 'impulsiva' del ciclo
4) si identificano le correnti continuative medie di scarica
5) si calcola la massima variazione di stato di carica all'interno del ciclo
6) si calcolano le perdite Joule associate all'intero ciclo
7) dai punti 1-6 deriva sia la scelta delle correnti di picco che di quelle continuative del ciclo test e del numero di ripetizioni delle stesse
8) si verifica la coerenza di quanto ottenuto.

Infine il ciclo di prova è stato utilizzato per eseguire alcune prove sulle batterie al litio da 40 Ah disponibili presso il laboratorio dell'Università di Pisa. Le prove di laboratorio sono state eseguite adattando il ciclo alle caratteristiche del sistema di accumulo ottenute con la simulazione svolta dall'Università di Pisa. Lo scopo di queste prove è stato quindi mirato non a studiare la vita delle batterie ma solo a verificare la validità del ciclo proposto.

La Tabella 20 riassume il calcolo delle potenze erogate ed assorbite dalle batterie nel caso di una cella elementare al litio commerciale, le potenze sono state ricavate tramite il simulatore: con le approssimazioni fatte è possibile ricavare lo stesso dato per altre celle e verificarne la coerenza tramite i risultati della prova sperimentale.

Tabella 20. Correnti e potenze massime erogate/assorbite da una cella da 40 Ah

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Potenza Massima [W]	Potenza Minima [W]	E_{Joule} [kJ]
SS1	200	-200	630	-550	10,5
SS4	175	-200	560	-545	12,4
SS9	107	-118	625	-545	2,8
Ciclo test	200	-200	740	-584	14,0

Con E_{Joule} si intende l'energia totale dispersa a causa delle perdite Joule sulla resistenza interna della cella in una intera giornata di lavoro. Le perdite per effetto Joule sono responsabili dell'innalzamento della temperatura di cella e costituiscono quindi un parametro fondamentale di caratterizzazione del ciclo.

La costruzione del ciclo di riferimento non conclude il lavoro, infatti i parametri che caratterizzano l'invecchiamento di una batteria sono la capacità, la resistenza interna e l'impedenza $z(j\omega)$, con l'invecchiamento la prima diminuisce e le seconde aumentano: si consideri che aumentando la resistenza interna diminuisce anche la potenza erogabile.

Durante una prova vita occorre quindi fare un controllo periodico dell'andamento di queste grandezze, in particolare del degrado della capacità e della resistenza ohmica: per farlo occorre prevedere di inframmezzare le prove sul ciclo test con un ciclo di carica/scarica standard.

La prova di laboratorio ha mostrato la validità dell'approccio adottato nel lavoro: la Tabella 17 permette anche una prima validazione del modello batteria adottato da Pisa in quanto i valori di potenza ottenuti nel ciclo di prova sono congruenti con quelli previsti dal simulatore.

Non è stata eseguita un'intera prova di vita sulla cella, che servirà successivamente per la validazione del ciclo e delle simulazioni effettuate.

Per maggiori informazioni sulla struttura del ciclo e sull'esecuzione dei test effettuati si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/189.

c.2 Analisi sperimentali per la "second life" di celle litio-ione

Dopo l'individuazione del fornitore industriale di celle a litio parzialmente esauste, è stata condotta, con l'acquisizione dei campioni (a costo zero), una campagna di sperimentazione mediante ciclatori di carica-scarica di almeno 5 celle commerciali con capacità residua, dopo uso in veicoli elettrici, di circa 80% della capacità nominale. La valutazione sperimentale della "second life" (intesa come la potenzialità applicativa in applicazioni stazionarie in modo da ridurre notevolmente il costo operativo, prima dello smaltimento) di queste celle, è stata eseguita sulla base dei profili caratteristici in alcune applicazioni tipiche per le reti elettriche. Inoltre è stata svolta la caratterizzazione termica della singola cella, consistente nella rilevazione del campo termico per mezzo di

termocoppie e termografie durante prove di carica e scarica, con lo scopo di individuare punti di criticità e valutare le necessità di eventuale raffreddamento in esercizio ed eventuale riscaldamento nell'avviamento a freddo.

Grazie alla collaborazione della FIB S.r.l. (ex FAAM), l'ENEA ha potuto acquisire delle celle degradate, ma ancora in buone condizioni, facenti parte di moduli batteria destinati alla trazione elettrica, e con esse ha potuto avviare una campagna di prove tesa a caratterizzarle e ad individuare delle condizioni di lavoro tali da non provocarne un veloce degrado delle prestazioni. Una volta raggiunti questi obiettivi sono state selezionate due celle per eseguire una prova vita su cicli costruiti in modo da schematizzare delle possibili applicazioni stazionarie in cui l'accumulo opera come riserva di energia[rapporto RdS/PAR2013/190].

In aggiunta le celle sono state sottoposte a caratterizzazione termografica. Le immagini termografiche acquisite durante i cicli di carica e scarica sono state elaborate correlandole ai valori dei parametri forniti dal ciclatore, permettendo di valutare il riscaldamento delle celle durante le varie fasi e al progredire dell'invecchiamento. I risultati mostrano che la variazione di temperatura rispetto a quella dell'ambiente di prova è sempre contenuta, ma aumenta quando la cella è invecchiata e le sue prestazioni elettriche si riducono notevolmente [rapporto RdS/PAR2013/191].

Attività preliminari

La FIB ha fornito all'ENEA delle celle utilizzate per la trazione elettrica del tipo al litio ferro fosfato. In totale sono state fornite 19 celle di forma prismatica: 15 celle da 90 Ah con tensione di circa 3,40 V e 4 celle da 40 Ah con tensione fra 3,5 e 3,6 V.

Le celle provengono da moduli diversi, ognuna ha una storia di vita indipendente da quella delle altre e non si è seguito un criterio univoco per il loro ritiro dai veicoli, caratteristica comune è che presentano una capacità residua molto alta, dell'ordine di almeno il 75% di quella nominale. La Figura 49 mostra una delle celle in prova. Inizialmente sono state eseguite delle prove di caratterizzazione con lo scopo di determinare l'effettiva capacità residua delle celle, ma anche quello di individuare una corrente continuativa di lavoro che non le danneggiasse in breve tempo. Il metodo utilizzato è stato quello di eseguire dei cicli di carica e scarica ad una determinata corrente I_c e di verificare a fine prova lo stato di salute della cella espresso in termini di capacità residua, variazione di resistenza interna ed eventuali modifiche della geometria del contenitore: in base al risultato di questa analisi si è stabilita la corrente di lavoro per la prova successiva.

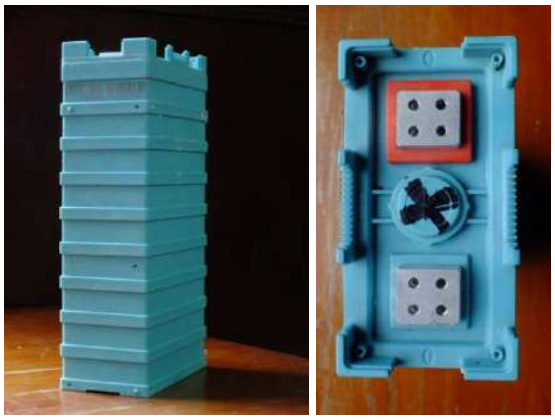


Figura 49. Esempio di cella in prova

Il primo test è stato eseguito considerando la capacità nominale della cella, ovvero 90 Ah, ed impostando un ciclo di scarica ad 1C, per cui la prima corrente di lavoro I_c è stata posta a 90 A: si è deciso di eseguire due cicli a 90 A ed uno a C/2 (I_c =45 A) allo scopo di indagare su eventuali dipendenze della capacità e della resistenza interna dalla corrente di scarica. I risultati del primo test sono riportati in Tabella 21.

Alla fine della prova il contenitore della cella risultava deformato, con rigonfiamento ai lati, come mostrato in Figura 50.

Tabella 21. Primo test di cella

FLT-LFMP 90 Ah 11100612505				
Ciclo	**Corrente [A]**	**Resistenza interna [mΩ]**	**Capacità [Ah]**	**Ah_{car}/Ah_{sc}**
1 - scarica	90	4,69	80,48	1,01
1 - carica	90	5,14	80,89	
2 - scarica	90	6,36	71,48	1,01
2 - carica	90	4,92	72,50	
3 - scarica	45	7,01	55,79	1,02
3 - carica	45	8,30	56,67	



Figura 50. Deformazione del contenitore della cella in prova paragonato ad uno integro

L'iterazione di queste prove di caratterizzazione ha consentito di individuare le condizioni operative più adatte allo "stato di salute" delle celle ricevute. Si è potuto concludere che a 30 A la capacità rimane praticamente invariata per i primi nove cicli di lavoro e la cella non subisce stress termici che portino a deformazioni del contenitore. Per verificare la validità generale di questo risultato si è eseguito un nuovo test su una cella già usata in precedenza nella prova a 90 A, che ha mostrato una capacità leggermente superiore senza ulteriori deformazioni del contenitore rispetto a quelle rilevate nella prima prova. Le prove eseguite su tutte le celle con la corrente a 30 A hanno messo in evidenza una sostanziale uniformità di caratteristiche delle celle, le quali sono generalmente dotate di una capacità residua compresa tra il 78 e l'88% di quella nominale, la resistenza interna risulta essere molto maggiore della nominale (1,8 mΩ).

L'attività sperimentale è stata rivolta alla comprensione dei possibili impieghi in "second life" delle celle esaurite. I primi risultati sul comportamento alle alte correnti hanno suggerito di indirizzare le condizioni operative su un servizio di "energia" e non di "potenza": un carico periodico, che assorbisse una potenza non molto alta (in modo continuativo) e con una profondità di scarica elevata.

Questa tipologia di funzionamento può essere associata a quella di un carroponte (alza un carico e lo sposta per poi riabbassarlo), una pompa (con il transitorio di avviamento ed il funzionamento a regime) ed anche quella di macchine di processo legate a produzioni in serie (ad es. un avvitatore + un nastro trasportatore), Il ciclo che ne esce è quindi molto semplice ma adatto a caratterizzare una vasta serie di applicazioni.

Sono state realizzare due diverse versioni del ciclo, denominate "Pro" e "Light": la versione "Pro" prevede un picco di corrente di 90 A mantenuto per tre minuti ed una corrente di carica/scarica continuativa di 30 A, mentre la "Light" utilizza una corrente di picco di 30 A ed una di carica/scarica di 15 A. Per il ciclo di lavoro "Pro" ci si aspetta una potenza massima erogata di 250 W e un'energia erogata massima di 200 Wh con un rapporto di 1,25 W/Wh, mentre per il ciclo di lavoro "Light" ci si aspetta una potenza massima erogata di 95 W e un'energia erogata massima di 250 Wh con un rapporto di 0,38 W/Wh. Testando due celle distinte ma di caratteristiche paragonabili tra di loro è possibile analizzare l'effetto di un dimezzamento della corrente continuativa di scarica sulla durata di vita dell'accumulo.

Risultati delle prove "second life"

Per valutare le prestazioni delle celle non si sceglie di sottoporle ad un ciclo standard dopo un intervallo prefissato di cicli di lavoro ma, vista la struttura dei cicli di test che si sono costruiti, ma di valutare ad ogni loro esecuzione i seguenti parametri: capacità scaricata, capacità ricaricata, rendimento amperorametrico e rendimento energetico.

Il rendimento amperorametrico è il rapporto tra la capacità totale scaricata e quella ricaricata, il rendimento energetico è invece il rapporto tra le energie totali scaricate e ricaricate. Il rendimento energetico è un parametro fondamentale per giudicare la convenienza dell'adozione di un sistema di accumulo: infatti la sua adozione ha un costo che può essere giustificato solo in termini di vita operativa e risparmio energetico, il dato è ancora più importante se si pensa di utilizzare il sistema di accumulo nella compravendita di energia in una rete elettrica .

E' stata sottoposta a test con un ciclo di lavoro "Pro" una cella che non aveva subito deformazioni durante le caratterizzazioni iniziali e con una capacità residua crescente nel test di caratterizzazione fino al 90% di quella nominale. Durante le prove di vita la capacità è andata inizialmente aumentando, partendo da un valore iniziale di 61 Ah fino a giungere ad uno massimo di 71 Ah, per poi iniziare a scendere.

Il test è stato interrotto quando la capacità residua in scarica della cella si è ridotta a 23 Ah (25% della nominale): il che è avvenuto dopo 75 cicli di prova, al termine del test la geometria della cella risultava profondamente deformata. La Figura 51 mostra la deformazione del case in confronto con una cella integra.



Figura 51. Deformazione del contenitore della cella in prova comparato con uno di riferimento

La Figura 52 mostra che dopo un transitorio iniziale in cui la cella ha acquisito capacità, si sono avuti altri 38 cicli in cui essa è diminuita in modo limitato, successivamente la capacità è scesa in modo molto accentuato. Associando la riduzione della capacità con il degrado della cella è possibile distinguere tre diverse fasi di degrado approssimabili con tre spezzate: nella prima la velocità di degrado è contenuta (fase 1) nella seconda aumenta (fase 2) e successivamente torna, sia pure in modo limitato, a diminuire (fase 3).

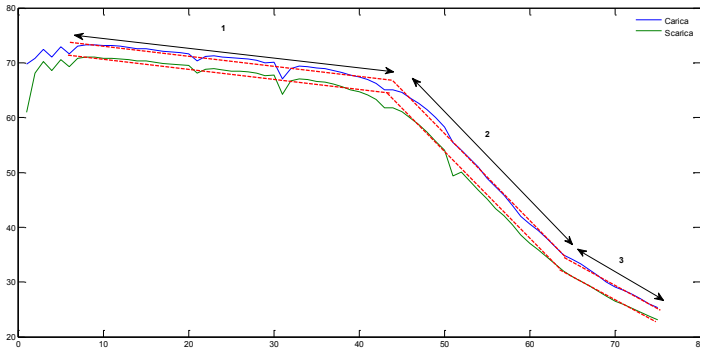


Figura 52. Velocità di degrado

A differenza del caso del ciclo “Pro”, nel caso di ciclo “Light” non si è avuto il transitorio di avviamento in cui la capacità cresceva, avendo iniziato la prova vita partendo già dalla massima capacità residua. Il rapporto amperorametrico rimane costante e simile a quello trovato per il caso del ciclo “Pro”, questo risultato era prevedibile anche osservando i risultati di tutte le prove di caratterizzazione eseguite.

In conclusione, i risultati ottenuti hanno evidenziato che è necessario caratterizzare le condizioni della cella o del modulo per individuare delle correnti di lavoro che non portino a un degrado troppo veloce delle prestazioni e che il tempo di vita del sistema di accumulo nell’applicazione considerata deve essere tale da giustificare il costo d’investimento necessario per il suo ricondizionamento. Per stimare il tempo di vita in una specifica applicazione occorre eseguire dei test su cicli di lavoro che la schematizzino. Finora le prove eseguite per applicazioni dell’accumulo come riserva di energia e non di potenza sono state interessanti per giustificare approfondimenti sulle possibilità della “second life”. La scelta del servizio “energia” non è solo legata alle caratteristiche del particolare modello di cella preso in considerazione, ma nasce dall’idea che è difficile definire la corrente di picco di una cella degradata e che, in generale, essa presenterà un’elevata resistenza interna e se utilizzata in applicazioni di potenza, lavorerà in condizioni di bassa efficienza e con un’aspettativa di vita limitata.

I risultati delle prove vita completa, ancora in corso, potranno dare utili indicazioni per cercare di approfondire il tema della stima della vita delle celle eseguita su cicli aventi caratteristiche simili ai due analizzati. Inoltre la disponibilità di altre celle usate con chimiche diverse potrà consentire di rendere più generali queste conclusioni.

Analisi termografiche su celle litio-ione

Sono state sottoposte a caratterizzazione termografica alcune celle litio-ione considerate a fine vita nel loro utilizzo nel settore automotive. Tali celle sono state sottoposte ad opportuni cicli di carica e scarica per valutare un loro ulteriore uso (second life) in ambito stazionario.

Per la caratterizzazione del transitorio termico durante i cicli di carica e scarica delle celle, è stata utilizzata una termocamera con acquisizione automatica delle termografie ad intervalli regolari per tutta la durata dei test. Questo permette di correlare la mappatura delle temperature della superficie della cella in esame con lo stato di carica e l'intensità della corrente della cella.

La termocamera viene impostata per registrare immagini termografiche generalmente ogni 5 o 10 minuti. Terminata la prova, tali immagini venivano elaborate in blocco con il software "ThermaCAM Researcher", che contiene funzioni di analisi termica, fra cui misura di spot, isoterme, profili, istogrammi di area, sottrazione di immagini ed altro, con la possibilità di registrare i risultati su file testo per essere poi utilizzati da altri programmi.

Per quanto riguarda la distribuzione delle temperature sulla superficie, sono stati controllati gli andamenti nel tempo dei profili di temperatura lungo tre rette, come mostrato in Figura 53b.

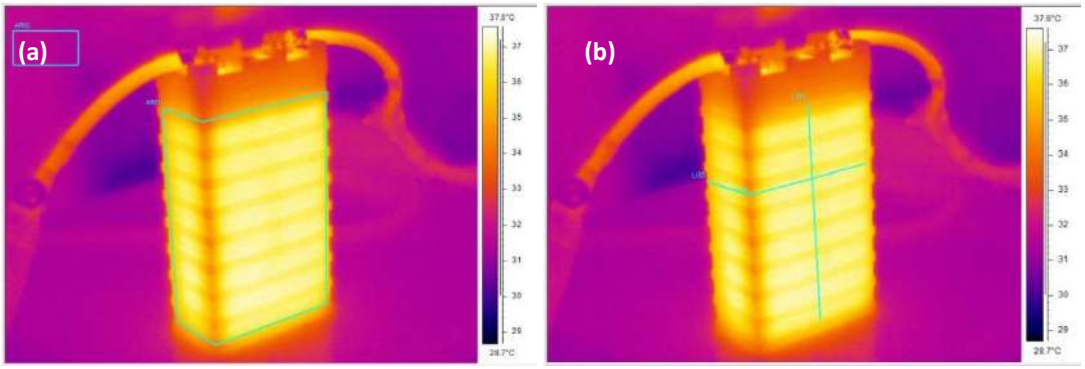


Figura 53. (a) tipiche aree di controllo per gli andamenti di temperatura nel tempo; (b) linee per il controllo della distribuzione della temperatura sulla superficie

Dapprima le celle sono state sottoposte ad alcuni cicli di verifica della capacità, che indicheremo come "cicli di caratterizzazione", condotti allo scopo di individuare i campioni da sottoporre a una serie di "cicli di lavoro" per la simulazione dell'uso reale in applicazioni di "second life".

In Figura 54 sono riportati gli andamenti nel tempo della temperatura massima e di quella media della cella, da cui si può osservare che durante la scarica si raggiungono temperature maggiori che in carica, nonostante si parta da valori ad inizio scarica più bassi di quelli ad inizio carica (a causa della maggiore durata della carica con la parte finale a bassa corrente) e che i riscaldamenti nella stessa fase dei diversi cicli hanno pendenze simili ma le temperature differiscono a causa del diverso valore iniziale.

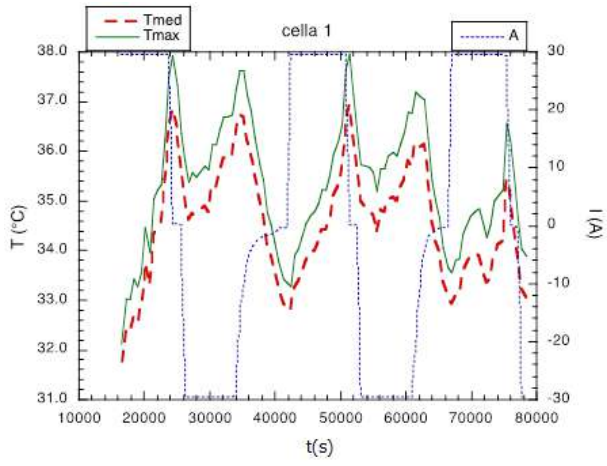


Figura 54. Temperatura media e massima durante i cicli, individuabili dalla corrente (positiva = scarica, negativa = carica)

Per annullare l'effetto della temperatura iniziale non costante, si è scelto di sostituire le temperature con la differenza tra la temperatura (massima o media) T(t) e il relativo valore T_0 all'inizio della fase di carica o scarica. Inoltre alle differenze ottenute è stata sottratta anche la variazione della temperatura ambiente dall'inizio della fase:

$$DT(t) = [T(t)-T_0] - [Tamb(t)-Tamb_0]$$

Il secondo termine, oltre al diverso raffreddamento convettivo provocato dalla variazione della temperatura dell'aria esterna (di entità trascurabile), compensa la variazione apparente delle temperature dovuta all'auto-taratura del sensore della termocamera in istanti non correlati con l'acquisizione delle immagini.

In Figura 55, che riporta le temperature in funzione della capacità raggiunta, si vede che il riscaldamento è identico nelle cariche (Ah <0), e molto simile tra le scariche.

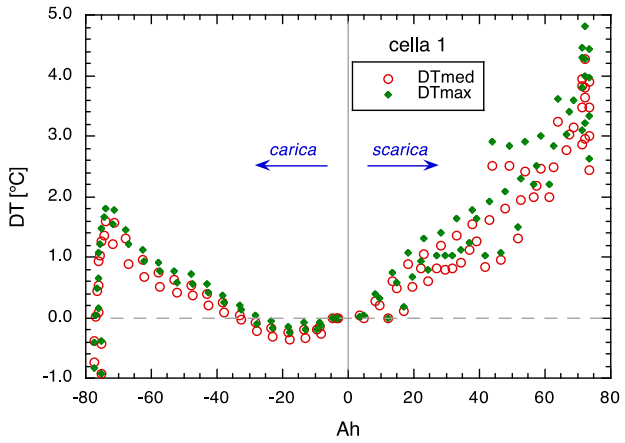


Figura 55. DT media e massima in funzione della quantità di carica

Per una tipica evoluzione in scarica, i grafici ottenuti sulla retta verticale con le quattro termografie sono riportati in Figura 56. Si vede che le temperature si mantengono piatte sulla parete, con le uniche oscillazioni date dalla presenza delle cave nelle quali si ha un riscaldamento maggiore per il minor spessore dello strato di plastica dell'involucro. Questi andamenti sono giustificabili considerando che le celle di questo tipo sono costituite all'interno da bustine piatte disposte parallelamente alla faccia maggiore e sovrapposte nella direzione dello spessore.

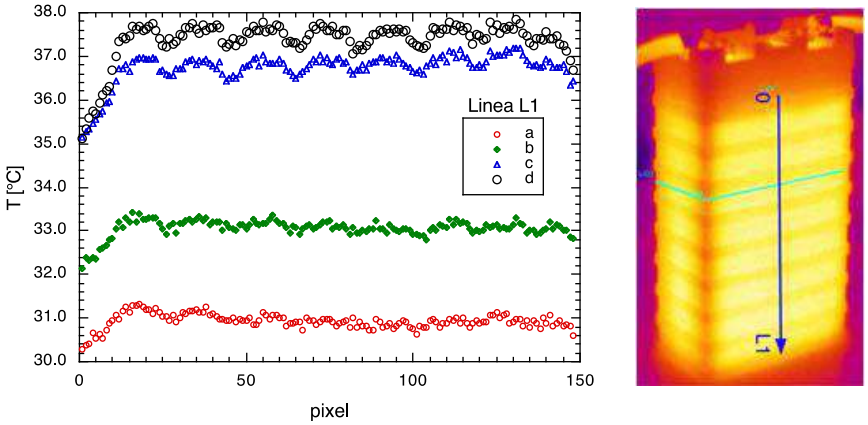


Figura 56. Profili di temperatura sulla linea di riferimento orizzontale, per quattro diversi stati di riscaldamento

Durante i cicli all'aumentare dell'invecchiamento delle celle, la temperatura tende a raggiungere valori sempre più alti, come atteso dalla prevedibile crescita della resistenza interna e quindi delle dissipazioni per effetto Joule, come mostrato in Figura 57 alla fine dei cicli di carica e scarica. Questo dimostra una notevole perdita di

rendimento al progredire dell'usura della cella, che si traduce in una minore capacità e un aumento del calore prodotto.

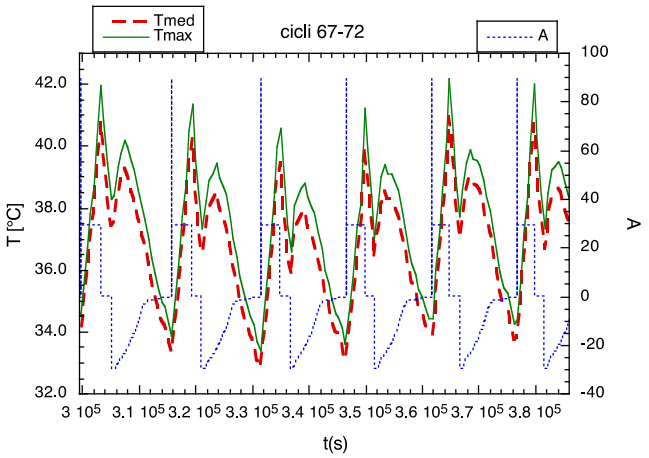


Figura 57. Temperatura media e massima alla fine dei cicli

La Figura 58, infine, mostra che il riscaldamento è talmente ridotto che nella prima fase (sia della scarica che della carica) la superficie continua a diminuire di temperatura, per poi risalire dopo che la quantità di carica ha superato la metà del massimo ottenibile.

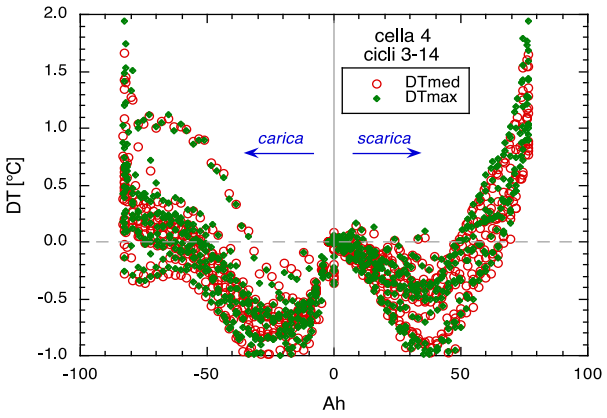


Figura 58. DT media e massima in funzione della quantità di carica

In conclusione, durante le prove di "second life", la riduzione delle prestazioni delle celle causa minori tempi o correnti di utilizzazione e quindi limita l'aumento del riscaldamento. Questo comportamento ha sconsigliato di studiare il raffreddamento delle celle con aria, per mezzo di uno specifico impianto sperimentale, in quanto l'analisi termografica non ha evidenziato necessita di raffreddamento delle celle durante il funzionamento.

Maggiori dettagli sulle prove e sui risultati delle analisi eseguite sulle diverse celle in esame sono contenute nel rapporto RdS/PAR2013/191.

c.3 Studi di sicurezza nell'applicazione dei sistemi di accumulo elettrochimico (alta temperatura e litio)

La produzione di energia elettrica generata da fonti rinnovabili è, a livello internazionale, sempre di più al centro delle politiche energetiche e ambientali. La discontinuità della produttività di queste fonti può essere affrontata e risolta attraverso la realizzazione di adeguati sistemi di accumulo, in grado di fornire l'energia elettrica quando richiesta. Tra le tecnologie disponibili, si annoverano quelle ad alta temperatura, basate su celle sodio-zolfo e sodio-cloruri metallici e quelle litio-ione.

Le quantità di materia e di energia in gioco nei sistemi di accumulo su larga scala ed i conseguenti rischi per l'uomo, l'ambiente e la proprietà, andrebbero valutati in fase di progettazione preliminare del sistema di accumulo, tenuto conto delle specificità di utilizzo, di allocazione e di manutenzione.

A tal fine, sebbene le tecnologie ad alta temperatura siano ritenute "tecnologie consolidate" sotto la maggior parte dei punti di vista, l'impiego su larga scala può porre problemi in termini di gestione del rischio di incidenti o di mal funzionamenti, legati sia alla reattività dei sistemi chimici impiegati che alla elevata temperatura di

funzionamento. A maggior ragione, questi problemi devono essere indagati per le tecnologie al Litio-ione, meno mature. In proposito, studi sistematici e sperimentazioni sull'identificazione dei pericoli (ad esempio, test di abuso) e sulla gestione del rischio (compresa l'individuazione di appositi sistemi di estinzione incendi) sono stati avviati di recente sia a livello internazionale che presso i Laboratori ENEA.

La presente attività ha inteso confrontare, in termini di sicurezza, le tecnologie sopra identificate e candidate alla realizzazione di grandi sistemi di accumulo stazionario. Sulla base degli studi di sicurezza in corso presso i nostri laboratori e in quelli di istituzioni pubbliche di rilievo internazionale, della letteratura scientifica disponibile e di articoli/comunicati stampa disponibili sul web, questa attività ha consentito:

- l'identificazione dei pericoli per la salute (uomo e ambiente) e la sicurezza,
- la valutazione delle quantità di materia ed energia associate a sistemi di accumulo "campione",
- la raccolta di informazioni relative ad incidenti occorsi ad impianti esistenti (dimostrativi o in esercizio),
- ipotesi su scenari incidentali.

L'ENEA ha effettuato un confronto tra le tecnologie ad alta temperatura (Na/S e Na/ $NiCl_2$, queste ultime anche denominate ZEBRA) e quelle Litio-ione in termini di impatto sulla salute sulla sicurezza dell'uomo e dell'ambiente. Sulla base delle informazioni disponibili, per le due principali tecnologie ad alta temperatura, sono state analizzate: le principali differenze tra le tecnologie, comprese informazioni sulla gestione del loro ciclo di vita; la casistica incidentale di pubblico dominio relativa ad impianti o impianti dimostrativi; le caratteristiche di pericolo delle sostanze chimiche presenti in condizioni di normale funzionamento. Infine è stato proposto un metodo di stima del contenuto totale di energia, utile per la stima del cosiddetto "carico d'incendio", che è stato applicato ad alcuni sistemi di accumulo ad alta temperatura e Litio-ione, proponendo un parametro di confronto tra i sistemi in esame. Questo studio ha comunque ancora carattere preliminare.

Tecnologie ad alta temperatura

Le batterie ad alta temperatura (sodio-zolfo Na/S, e sodio-cloruro di nichel Na/Cl_2) sono tra i sistemi di accumulo elettrochimico più utilizzati finora nelle reti elettriche.

In merito al trasporto strada e ferrovia, le batterie che contengono sodio, Na/S incluse, sono classificate in Classe ADR 4.3 con Numero UN 3292. Pertanto celle e batterie contenenti sodio metallico devono essere trasportate fredde (con il sodio solido), cioè scariche e non ancora attivate ed etichettate ed imballate a secondo della specifica modalità.

E' necessario osservare che, mentre i sistemi Na/S contengono sin da subito il sodio metallico, le Na/Cl_2 non ancora attivate, contengono sodio sotto forma di NaCl giacché il sodio metallico si produce solo a seguito dell'elettrolisi iniziale, che viene effettuata sul luogo di utilizzo. Questo potrebbe consentirne il trasporto in condizioni meno severe e, quindi, potrebbe portare all'attribuzione di altro codice UN.

E' necessario premettere che, come messo opportunamente in evidenza dal National Research Energy Laboratory (NREL), gli studi di sicurezza effettuati a livello delle celle non possono sempre essere estrapolati alle batterie, nelle quali risulta fondamentale l'interazione tra le celle e lo smaltimento del calore sviluppato dal loro funzionamento singolo e in sincronia. Occorre inoltre distinguere tra le prove ed i comportamenti nelle condizioni di normale funzionamento e quelli osservati nel caso di abuso, ovvero di funzionamento anomalo.

La metodologia impiegata per individuare i pericoli per la salute umana, la sicurezza e l'ambiente (*Health, Safety & Environment,* HSE) connessi all'uso di sistemi a base sodio (Na/S e Na/Cl_2) è basata sulla raccolta di informazioni secondo lo schema della Safety Review presentato per le tecnologie Litio-ione e sull'elaborazione di queste informazioni ai fini della stima della quantità di energia totale che può essere rilasciata in caso di incendio e della stima dei rischi per la salute.

In particolare, la stima dei pericoli per la salute è stata effettuata associando alle sostanze presenti nei sistemi esaminati, nelle loro condizioni di normale funzionamento, l'indice di pericolo P_{score} che è parte integrante dell'algoritmo MoVaRisCh elaborato dalla ASL di Modena[2] per la valutazione dell'esposizione occupazionale. Mentre la stima della quantità di energia è stata effettuata secondo il modello presentato dalla Fire Protection Research Foundation (FPRF)[3] nel 2011: i dati relativi alla quantità di energia, se riporti all'unità di potenza del sistema di accumulo, potrebbero essere utilizzati per confrontare tra loro, sotto il profilo dei rischi per la sicurezza, sistemi di accumulo realizzati con diverse tecnologie.

[2] Modello di valutazione del rischio chimico – MOVARISCH. Aggiornamento del 4 settembre 2013. http://www.ausl.mo.it/dsp/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1783

[3] C. Mikolajczak et al., " Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment", Fire Protection Research Foundation, Luglio 2011

Nel caso specifico di ambienti di lavoro in cui vengono prodotti, utilizzati e/o manipolati sistemi di accumulo elettrochimico, essi devono essere protetti dal rischio esplosione e incendio e possedere le autorizzazioni igienico sanitarie previste dalle norme vigenti in base alla loro destinazione d'uso.

A livello della valutazione dei rischi connessi all'esercizio di un sistema di accumulo stazionario di dimensioni "industriali" è necessario fare riferimento agli algoritmi utilizzati nel settore industriale per la prevenzione dei rischi di incidenti rilevanti, quali il *DOW F&E index* e le norme giuridiche in vigore: D.P.C.M. 31 marzo 1989[4] e il D.M. 20 ottobre 1998[5], potendo assimilare in prima approssimazione, un impianto di accumulo stazionario di energia realizzato con sistemi elettrochimici ad alta temperatura, ad un deposito di liquidi infiammabili e/o tossici, in quanto sono presenti sostanze pericolose allo stato liquido e ad alla temperatura di funzionamento pari a circa 300 °C.

L'identificazione dei pericoli insiti nella cella o riconducibili al suo utilizzo, parte dalla individuazione della sua composizione chimica. L'uso di sostanze reattive comporta, di per sé, un pericolo.

Nel caso delle celle e batterie Na-S, i ben noti pericoli collegati all'uso di Na e S elementari, sono accentuati dalla necessità di mantenere la temperatura operativa a circa 350 °C per garantire l'elevata conducibilità dell'elettrolita ceramico (beta allumina). A questa temperatura sia il sodio che lo zolfo sono allo stato liquido.

I pericoli di natura chimica sono connessi con le sostanze che costituiscono la batteria con quelle prodotte da reazioni primarie; con quelle provenienti da reazioni secondarie indesiderate provocate, ad esempio, dal contatto accidentale con contaminanti, come può accadere nel caso di un abuso; da impurezze, correlabili a difetti della fabbricazione, che possono innescare reazioni secondarie non desiderate.

Una tipica batteria da 50 kWh necessaria ad alimentare un veicolo elettrico, contiene circa 40 kg di sodio fuso e 60 kg di zolfo fuso alla temperatura operativa di 350 °C: questo dato è importante per effettuare valutazioni sulle conseguenze di un rilascio completo di materia e energia. Per dirlo in termini tecnici: per valutare le conseguenze del rilascio accidentale nell'ipotesi di *worst case.*

Per quanto riguarda la casistica degli incidenti, il 21 settembre 2011 a Tsukuba (Japan), un sistema di accumulo elettrico di 2MW di proprietà della Tokyo Electric Power Company ed installato nella città di Joso, si è incendiato. Sono state necessarie 8,5 ore per mettere sotto controllo l'incendio e non è stato dichiarato estinto prima di due settimane, non ci sono state vittime e l'incendio è rimasto confinato. Il sistema era realizzato con batterie NaS prodotte dalla NGK Insulators che ne ha bloccato la produzione fino a completamento delle indagini delle cause d'incidente e la manutenzione delle 174 batterie che erano state immesse sul mercato.

Accumulo elettrochimico agli ioni litio: studi sulla sicurezza

L'aspetto fondamentale di questa tecnologia al litio è la continua evoluzione dei sistemi litio-ione. Si tratta di una tecnologia giovane, con una variabilità estrema in termini di geometria e, soprattutto, di composizione chimica.

Uno studio sulla sicurezza delle tecnologie litio-ione del 2011, predisposto dalla società *Exponent Failure Analysis Associates*[6] per *The Fire Protection Research Foundation*, è stato un riferimento determinante per le attività svolte in precedenza in ENEA. Questo studio è stato completato con una seconda parte pubblicata nel 2013[7], nella quale si presenta la caratterizzazione dell'infiammabilità delle batterie litio-ione ai fini del loro stoccaggio: condizione davvero prossima alla ipotesi di impieghi stazionari, soprattutto per la quantità di materia in gioco.

Altri studi interessanti sono quelli presentati dall'INERIS (Institut National de l'Environnement industriel et des Risques) sulle tecniche per la valutazione della sicurezza e sugli insegnamenti da trarre da incidenti che hanno visto coinvolte le batterie Litio-ione ai fini dello sviluppo di competenze specifiche per la gestione di grandi quantità di batterie al Litio-ione, nuove e usate. Significativa la dotazione strumentale dei laboratori INERIS per le prove di abuso ed incendio.

C'è da osservare un interesse crescente verso la gestione della salute e sicurezza sul lavoro (regolamentazioni OHS, a livello internazionale; D.Lgs. 81/08 e sue modifiche ed integrazioni), ovvero all'identificazione e gestione dei pericoli cui sono esposti i lavoratori addetti all'industria di produzione e smaltimento dei sistemi Litio-ione e alla loro logistica: gli incidenti occorsi (alcuni dei quali già recensiti da Exponent nel rapporto del 2011) spesso

[4] D.P.C.M. 31 marzo 1989,: "Applicazione dell'art. 12 del decreto del Presidente della Repubblica 17 maggio 1988, n. 175, concernente rischi rilevanti connessi a determinate attività industriali".

[5] D.M. 20 ottobre 1998,: "Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici

[6] C. Mikolajczak et al. "Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment", Fire Protection Research Foundation, Luglio 2011

[7] B.Ditch, C.r Wieczorek, "Flammability Characterization of Li-ion Batteries in Bulk Storage", SUPDET 2013, Orlando, FLd

hanno coinvolto lavoratori ed è necessario mettere in evidenza che la produzione di questi dispositivi di accumulo avviene essenzialmente in Giappone, Cina e Corea del sud, paesi nei quali la sicurezza dei luoghi di lavoro non è garantita quanto in Europa, USA e Canada.

A titolo di esempio, in Figura 59 si presentano i "Modi di guasto" (eventi) e le loro conseguenze, che vanno dall'invecchiamento precoce alla esplosione: la figura rappresenta il lavoro sulla scelta dei sistemi di estinzione degli incendi per i sistemi litio-ione in prova presso il laboratorio ENEA-UTTEI VEBIM, anche in previsione delle prove di abuso che vi verranno condotte.

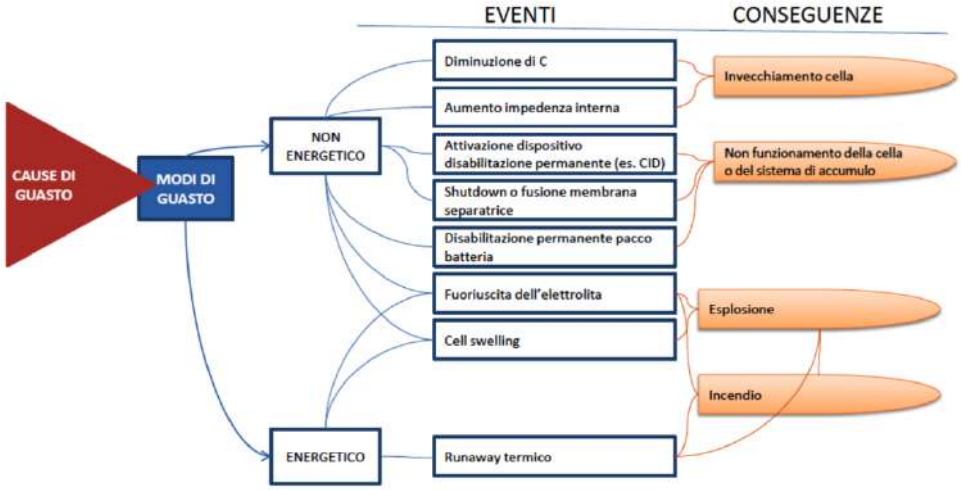


Figura 59. Modi di guasto (eventi) e conseguenze per celle con tecnologia litio-ione

Pe concludere è' stata proposta una metodologia di stima dei pericoli per la salute e per la sicurezza (rischio incendio ed esplosione) basata sulla documentazione della composizione chimica dei sistemi di accumulo, della classificazione ed etichettatura delle sostanze pericolose (effettuata secondo la normativa vigente) presenti nelle celle elettrochimiche che li costituiscono, delle specifiche tecniche e dei calori di combustione associati alle sostanze chimiche combustibili, al fine di calcolare il carico di incendio nel caso peggiore (*worst case*).

La metodologia è stata applicata ad un sistema litio-ione NMC e ad un sistema Na/S, rilevando nel primo caso una importante incidenza dei rischi per la salute dovuti al nichel, rispetto al caso delle tecnologie Na/S, per le quali i rischi per la sicurezza sono di importanza fondamentale. Dettagli sull'attività svolta sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/192.

d. Recupero di materiali da batterie al litio a fine vita

Il numero sempre crescente di batterie agli ioni litio, dovuto alle loro caratteristiche di alta densità energetica, leggerezza, lunga durata di utilizzo e al continuo sviluppo con il raggiungimento degli obiettivi tecnici richiesti dal mercato, rende il riciclaggio di tali dispositivi una necessità legata sia ad aspetti ambientali che economici. Inoltre la direttiva Europea 2006/66/CE, entrata in vigore il 26 settembre 2006 in tutti gli stati membri UE, sancisce che tutte le pile ed accumulatori, indipendentemente dalla loro classificazione elettrochimica, devono essere raccolte per poi essere successivamente riciclate. In particolare entro il 2016 si deve raggiungere il 45% di raccolta dell'immesso sul mercato con un target di efficienza del 50% del processo di recupero.

Tuttavia il riciclo delle batterie agli ioni di litio è un processo complesso costituito da diverse fasi che vanno dall'apertura in sicurezza delle batterie, alla separazione dei diversi componenti, e al recupero dei materiali, in cui sono da valutare e gestire rischi chimici differenti, quali la presenza di metalli a potenziale attività cancerogena, di vapori tossici e di litio metallico anche in forma libera, che può essere causa di incendi ed esplosioni se non adeguatamente gestito.

La presente attività si pone l'obiettivo di progettare e sviluppare processi di separazione e recupero ecosostenibile dei materiali attivi (catodo e anodo) ottenuti da batterie al litio esauste, anche mediante lo sviluppo di soluzioni innovative, già studiate preliminarmente nell'anno precedente. La separazione dei materiali attivi dai relativi supporti metallici e/o plastici viene effettuata mediante progettazione di opportune miscele ecologiche di solventi

organici studiate ad hoc per le diverse tipologie di materiali attivi, e mediante utilizzo di processi fisici, o tramite un processo chimico di solvatazione, ecosostenibili. La separazione è una fase critica del processo di riciclo: da essa può dipendere la quantità, la purezza e la struttura del materiale recuperato.

Altra criticità è rappresentata dallo sviluppo di processi eco innovativi per il recupero selettivo di metalli ad elevato valore aggiunto. L'idrometallurgia rappresenta una soluzione tecnologica innovativa a basso impatto ambientale per il recupero di metalli ad elevati livelli di purezza.

Le attività ENEA in particolare possono essere riassunte in:

1. messa a punto di un processo di apertura in sicurezza di celle al litio
2. sviluppo di un processo di riciclaggio ecocompatibile per solvatazione e sonicazione
3. studio preliminare di un processo di riciclaggio idrometallurgico
4. valutazioni di LCA (life cycle assessment) di celle al litio.

d.1 Sviluppo di una metodologia di apertura in sicurezza di batterie al litio a fine vita

Questa attività si pone come obiettivo lo sviluppo di una metodologia di apertura in sicurezza di batterie al litio di diverso design. L'ENEA ha svolto uno studio incentrato sull'identificazione dei pericoli correlati all'apertura di celle litio-ione e ha proposto una procedura di apertura in sicurezza delle celle, nel rispetto della gestione dei rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori e dell'ambiente [rapporto RdS/PAR2013/193].

L'apertura delle celle litio-ione è un'operazione che non riguarda solo le attività di ricerca e sviluppo, ma anche le attività di gestione delle batterie giunte a fine vita, ed in particolare quelle che precedono l'apertura stessa.

E' noto che con il termine abbreviato "litio-ione" si fa riferimento ad una famiglia di celle elettrochimiche di diversa composizione chimica, in cui i materiali che costituiscono l'elettrodo negativo (anodo) e quello positivo (catodo) sono ospiti di ioni litio che si intercalano all'interno dei materiali elettrodici. Le celle non sono costituite da litio metallico e sono ricaricabili. Ne consegue che non esiste una cella litio-ione standard.

L'esigenza di operare su scala di laboratorio nello sviluppo di processi di recupero di materiale dalle celle Litio-ione *post mortem*, sia per invecchiamento che per guasto, e di spingere l'ispezione visiva delle celle sottoposte a prove di abuso anche al loro interno, pone il problema di aprire in sicurezza questi dispositivi. Lo stesso problema si pone a livello industriale negli impianti di trattamento delle celle giunte a fine vita per il recupero dei materiali costituenti, specialmente nel caso di processi diversi da quelli classici del tipo idro e piro metallurgico.

Prima di arrivare ad aprire una cella litio-ione, è necessario effettuare una serie di operazioni, la più importante delle quali è l'identificazione della composizione chimica. Supponendo di partire da un pacco batteria o da sistema di accumulo, in Tabella 22 si riportano le operazioni che è necessario svolgere.

Tabella 22. Operazioni preliminari all'apertura di una cella litio-ione

RIF.	OPERAZIONE		DESCRIZIONE	COSA FARE	OUTPUT
1	**Smontaggio pacco batteria o sistema di accumulo**		Separazione delle celle dal contenitore	Prelevare le celle e isolare i contatti con nastro isolante o nastro adesivo.	Celle Litio-ione (+ contenitore, elettronica, cavi collegamento, ecc.)
2	**Verifica integrità e Identificazione delle celle**		Ispezionare le celle e verificarne l'integrità Identificare la tipologia e la composizione chimica della cella	- Osservazione della cella - Acquisizione delle specifiche tecniche (ST) - Acquisizione della Scheda di Sicurezza (SDS o MSDS)	Scheda "anagrafica" sulla quale riportare: - Codice stampigliato e significato - Composizione chimica (Da SDS) - Specifiche tecniche
3	**Separazione delle celle secondo la loro chimica**				
4	**Separazione delle celle danneggiate da quelle integre**	**Celle integre**	Verificare lo stato di carica ed eventualmente portare a 0 V		
		Celle danneggiate	Ispezione visiva. La cella può presentarsi: - rigonfiata - con segni di abuso - con fuoriuscita di materiale - con bruciature o presenza di materiale fuso	Annotare le osservazioni sulla scheda anagrafica	

Per individuare la composizione chimica delle celle è stata studiata una procedura basata su analisi EDX che non prevede apertura della cella. La procedura è stata analizzata utilizzando una cella EiG C80 con geometria *soft-pouch* e catodo NiCoMn, già studiata dal punto di vista della sicurezza.

La tecnica proposta risulta rapida e non distruttiva. I risultati ottenuti all'EDX rendono, tuttavia, necessario impostare una campagna di monitoraggio di celle Litio-ione a diversa geometria e composiione, al fine di verificare la possibilità di utilizzare questa tecnica su linee industriali di selezionamento.

d.2 Sviluppo di processi di separazione dei materiali attivi dai supporti tramite processi di sonicazione

Questa attività è indirizzata allo sviluppo, dopo la scarica e l'apertura della batteria in sicurezza, di processi innovativi di separazione per via chimica delle polveri attive dai collettori metallici (Al per il catodo e Cu per l'anodo) e del separatore polimerico. Tale separazione avviene attraverso un processo di solvatazione del legante, costituito principalmente da polivinildifloruro (PVDF), tramite una nuova miscela di solventi organici eco-sostenibile selezionata nel corso della precedente annualità. La ricerca si occupa quindi della caratterizzazione della miscela e del materiale separato e recuperato. Viene investigata la possibilità di sviluppare un processo di separazione di tipo fisico che prevede la dissoluzione dei fogli catodici e anodici in acqua e la separazione delle polveri attive dai relativi supporti attraverso un processo di sonicazione della sospensione acquosa. Inoltre si propone lo studio di fattibilità dell'estrazione del legante e dell'elettrolita dai fogli catodici e anodici mediante un processo di solvatazione con la CO_2 supercritica. Il recupero dei materiali è effettuato attraverso sistemi di vagliatura e centrifugazione.

Nello specifico, l'ENEA ha svolto uno studio rivolto allo sviluppo di un processo eco-sostenibile di recupero non distruttivo dei materiali da batteria al litio secondarie (LIBs).

Il flow sheet del processo eco-sostenibile proposto per il recupero dei materiali da batterie al litio secondarie è mostrato in Figura 60. Le singole operazioni comprendono le due classi principali di processi di recupero: processi fisici e processi chimici.

La sequenza delle operazioni prevede, dopo la verifica e la scarica elettrica completa della batteria, l'apertura della stessa con strumenti meccanici (cacciavite pinze e mezzi taglienti).

Lo schema del processo prevede quindi una prima operazione di separazione fisica in cui il materiale plastico e metallico dell'involucro e gli eventuali circuiti e valvole di protezione sono divisi manualmente dal resto del materiale (nastro catodico, nastro anodico e del separatore). L'operazione successiva consiste nell'allontanamento di eventuali sostanze nocive volatili, presenti nei dispositivi mediante un'operazione di degassaggio del materiale in temperatura effettuato sotto vuoto o in flusso CO_2. Dopo la fase di stabilizzazione del materiale, si procede con il recupero dell'elettrolita mediante un'operazione di estrazione con l'anidride carbonica liquida supercritica ($ScCO_2$). Come riportato in figura l'operazione successiva consiste nella separazione fisica dei tre nastri e lo schema del processo prevede quindi tre sequenze di operazioni distinte per ogni tipo di nastro ma simili tra di loro.

Considerando ad esempio la sequenza delle operazioni riguardanti il solo nastro catodico, come riportato nel flow sheet, l'operazione successiva è la separazione dei materiali attivi dai relativi supporti per il recupero del collettore di alluminio.

Dopo il recupero del collettore effettuato con il primo metodo (solvatazione), il flow sheet del processo prevede per la soluzione eterogenea contenente il materiale attivo, il PVDF e la miscela di solvente, un'operazione di filtrazione sotto vuoto che separa il materiale attivo solido dalla fase liquida costituita dal PVDF solvatato e la miscela di solventi.

Lo schema del processo prevede poi il recupero del PVDF dalla miscela di solventi organici mediante la precipitazione del legante con un non-solvente e la sua separazione dalla soluzione attraverso un processo di centrifugazione o filtrazione.

Lo schema (B) relativo al secondo metodo prevede, nell'operazione di distacco e separazione dei materiali attivi dai supporti per il recupero di questi ultimi, un trattamento di sonicazione dei nastri in mezzi Liquidi. In seguito, dopo il recupero del collettore, la soluzione eterogenea costituita dal mezzo disperdente usato nel trattamento con gli ultrasuoni e dalla polvere attiva è analizzata e trattata per poi procedere se necessario all'operazione di solvatazione del PVDF con la miscela di solventi organici com'è descritta per lo schema A.

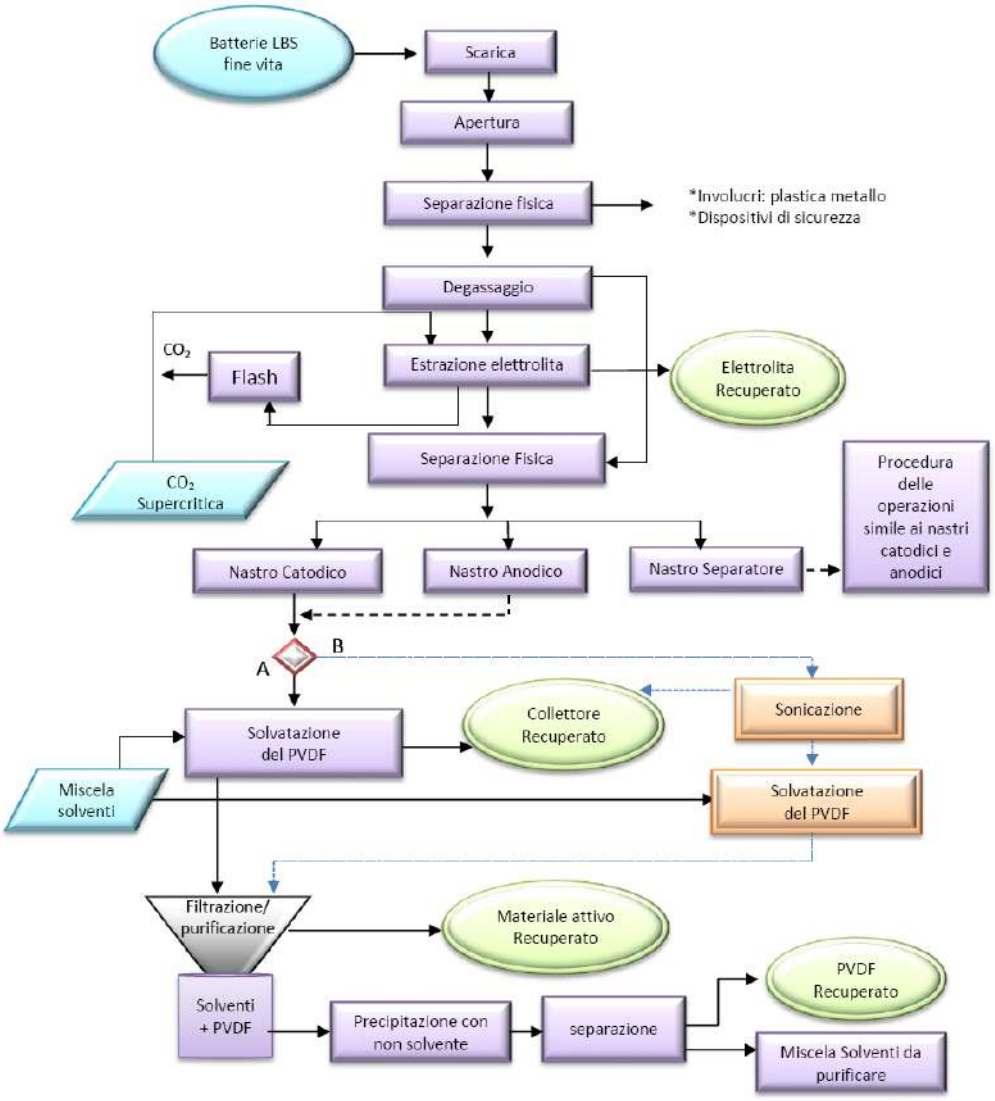


Figura 60. Flow sheet del processo eco-sostenibile di recupero diretto di materiale dalle batterie LIBs

In quest'anno di attività, lo scale-up di laboratorio su prove di solvatazione dei nastri catodici e anodici, con la miscela formulata nel corso dell'annualità precedente[8] (miscela S) ha evidenziato la non riproducibilità dei parametri di reazione per la separazione delle poveri dai supporti. Inoltre a causa della densità della soluzione eterogenea contenente la miscela S l'operazione di filtrazione è risultata critica.

Al fine di migliorare il potere solvente dalla miscela S e le sue caratteristiche di densità, sono state aggiunte ad essa piccole percentuali di tensioattivo. La nuova miscela, in seguito chiamata "miscela QE", è stata il principale oggetto di studio. Sono state eseguite prove preliminari anche su un'altra miscela di soventi organici, in seguito chiamata "miscela QB".

La separazione ed il recupero di materiali da batterie commerciali sono state effettuate mediante processo di solvatazione e di sonicazione. Per esempio lo studio del processo di solvatazione del legante PVDF puro si è reso indispensabile per meglio comprendere il processo di separazione dei materiali attivi dai relativi supporti. Il polimero PVDF puro sotto forma di palline è stato macinato con un mulino a lame e i filamenti ottenuti utilizzati per le prove di solubilità. Il recupero del collettore metallico di alluminio è ottenuto mediante il processo di solvatazione del legante PVDF presente nella polvere attiva catodica. Il ruolo del PVDF è quello di garantire

[8] M. R. Mancini, S. Frangini, C. Alvani, M. L. Grilli, M. Falconieri Recupero eco-sostenibile di materiali da batterie litio-ione esauste: studi preliminari, Report RdS/2013/256 (PAR 2012)

l'adesione della polvere catodica al collettore. Per lo studio del processo come solvente, è stata utilizzata una miscela appositamente sviluppata.

Il processo di solvatazione o di dissoluzione di un polimero è un processo complesso in cui intervengono diversi fattori. Durante l'attività sperimentale sono stati individuati svariati parametri che influenzano l'operazione di solvatazione del legante PVDF i principali:

- le dimensioni dei nastri
- il rapporto in peso tra nastro catodico/solvente
- il rapporto volumetrico tra il solvente e la camera di reazione considerando la tensione di vapore della miscela alla temperatura di utilizzo
- la potenza e il tempo di sonicazione
- la temperatura e il tempo di reazione di solvatazione
- l'influenza della solvatazione sotto agitazione
- le diverse formulazioni della miscela di solventi organici eco-sostenibili.

Numerose prove sono state eseguite per ottimizzare alcuni di questi parametri. L'operazione di dissoluzione è stata studiata inizialmente sul nastro catodico in quanto all'apertura della batteria, l'adesione del materiale catodico al collettore di alluminio è stata più omogenea rispetto a quella del materiale anodico al collettore di rame.

Dal nastro catodico ricavato all'apertura della batteria commerciale Sony 18650, sono stati ritagliati provini di circa 2 cm x 2 cm che sono stati introdotti in una camera di reazione consistente in una boccetta di vetro Duran con tappo a vite resistente alle alte temperature a cui è stata aggiunta la miscela di solventi organici in quantità circa il triplo del peso del campione.

In Figura 61 sono riportati gli andamenti delle curve TG/DTA registrati sul materiale catodico recuperato. La curva DTA presenta nel range di temperatura tra 50-400 °C due picchi endotermici a 115 e 247 °C e un picco esotermico a circa 303 °C relativi ai soli processi di ebollizione e decomposizione della miscela di solventi QE residua nella polvere recuperata. A temperature più alte, 400-600 °C, la curva DTA mostra un picco esotermico allargato con due massimi a 468 e 496 °C e nello stesso range di temperatura, la curva TG evidenzia una diminuzione di peso dovuta alla decomposizione del polimero PVDF. Esattamente, in questo range di temperatura, la curva DTA di riferimento del PVDF puro mostra un picco esotermico allargato di decomposizione com'è mostrato in Figura 100.

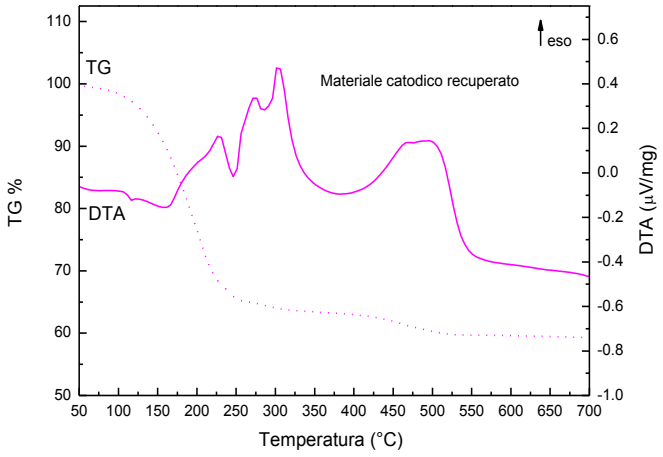


Figura 61. Curve TG/DTA del materiale catodico recuperato dopo filtrazione effettuate a 10°C/min in flusso d'aria a 100cc/min

L'analisi termica effettuata sul materiale catodico ha rilevato che la polvere contiene ancora del solvente QE come previsto e una percentuale elevata di PVDF (3,04%).

Infine, sono eseguiti gli esperimenti in laboratorio sulla separazione fisica, dei componenti dei nastri catodici e anodici ottenuti della batteria commerciale Sony 18650 mediante il processo di sonicazione. Inizialmente la capacità degli ultrasuoni di provocare il distacco della polvere attiva dai nastri elettrodici è stata verificata operando con un sonicatore da 500 W, il cui convertitore trasforma l'energia elettrica ad alta frequenza proveniente dal generatore in vibrazione meccanica alla frequenza di 20 kHz, correlato di una sonda da 13 cm per l'amplificazione delle vibrazioni longitudinali in titanio. Poi, la sonda di titanio del sonicatore, è stata immersa in un becher di acqua distillata contenente del nastro elettrodico e diverse prove sono state eseguite variando

l'ampiezza degli ultrasuoni (che può essere regolata dal 20 al 100%) e lo stop dello strumento che può essere definito a intervalli regolari in modo da evitare i problemi di riscaldamento eccessivo del campione. Inoltre è stato variato il tempo totale del processo. Il risultato delle prime prove non è stato però incoraggiante in quanto, i parametri di tempo e ampiezza degli ultrasuoni che sono risultati efficaci nel distacco della polvere dai collettori metallici hanno prodotto anche una frantumazione fine dei collettori.

In Figura 62 è mostrata una foto di un nastro anodico dopo trattamento di sonicazione avvenuto con 60% di ampiezza degli ultrasuoni per 20 min in discontinuo per non aumentare troppo la temperatura che è rimasta durante il processo sotto i 100°C.



Figura 62. Immagine del nastro anodico dopo sonicazione (60% di ampiezza) in mezzo acquoso per 20 min

Dopo i risultati ottenuti con il sonicatore a sonda, si è stabilito di operate con una vasca a ultrasuoni che permette di studiare l'effetto della sonicazione sui campioni variando la frequenza (37 o 80 kHz), la potenza da 10 a 100 W, la temperatura (valore massimo 80 °C) e il tempo di sonicazione.

L'effetto del mezzo di propagazione delle onde acustiche sul processo di separazione delle polveri dai relativi supporti e stato studiato utilizzando la vasca ad ultrasuoni che ha permesso di testare contemporaneamente campioni con mezzi liquidi differenti (acqua distillata, acqua con l'aggiunta di un tensioattivo e miscela di solventi QE). Nelle condizioni di prova utilizzate, i migliori risultati di distacco della polvere elettrodica sono stati ottenuti con l'utilizzo di acqua distillata come mezzo di propagazione dell'onda sonora.

Per maggiori informazioni sull'attività svolta e sui risultati ottenuti si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/194.

d.3 Sviluppo di un processo per il recupero di materiali di elevato valore aggiunto da batterie al litio esauste tramite processi idrometallurgici

Il problema del recupero dei materiali da batterie al litio esauste è stato affrontato dall'ENEA attraverso l'applicazione di tecnologie eco-sostenibili di tipo idrometallurgico, prevedendo schematicamente le seguenti azioni:

- valutazione e confronto delle tecnologie già in uso relative a pre-trattamenti meccanici e/o fisici, a trattamenti fisici e chimico-fisici;
- caratterizzazione del materiale elettrodico delle batterie attraverso tecniche analitiche di tipo ottico, spettrofotometrico e cromatografico quali, spettroscopia ad assorbimento atomico e uv-vis, cromatografia ionica;
- individuazione di un processo idrometallurgico per il recupero dei materiali di interesse attraverso l'analisi di tecniche di lisciviazione, di separazione chimica (estrazione con solvente, precipitazione frazionata, scambio ionico etc.) ed elettrochimica;
- sperimentazione del processo in scala laboratorio.

La tempistica delle attività è su due anni; nel prossimo anno verranno completate la sperimentazione del processo in scala pre-pilota ed effettuata la progettazione di un impianto pilota sulla base del processo sviluppato.

Recupero e smaltimento delle batterie al litio

Nel decennio 2000-2010, la produzione annuale delle batterie al litio è aumentata dell'800% a causa dell'aumento del consumo di dispositivi elettronici (telefoni cellulari, computer e videocamere) e si prevede che con lo sviluppo dell'industria dei veicoli elettrici ci assisterà ad un ulteriore aumento che porterà nel 2020 ad una quantità e peso di LIBs (batterie litio-ione) esauste che potrà superare le 25 miliardi di unità e le 500 migliaia di tonnellate. E' evidente quindi come il loro recupero sia diventato un problema di urgente risoluzione considerando anche il diffondersi di una maggiore coscienza ambientale.

Le batterie al litio necessitano di uno smaltimento sicuro in virtù della presenza di elementi o composti infiammabili e tossici; in particolare tali batterie sono costituite da metalli pesanti, composti organici e plastica nelle proporzioni: 5-30% Co, 5-10% Ni, 2-15% Li, 7-25% Cu, 3-14% Al, 15% composti organici, 7% plastiche con piccole variazioni a seconda dei produttori. Delle 4.000 tonnellate di batterie agli ioni di litio scadute raccolte nel 2005, 1.100 erano costituite da metalli pesanti, mentre altre 200 erano costituite da elettroliti tossici. Oltre alla presenza di sostanze nocive, che vanno dalla presenza di metalli a potenziale attività cancerogena, alla presenza di vapori tossici (ad esempio acido fluoridrico), la presenza di litio metallico anche in forma libera, può essere causa d'incendi ed esplosioni ove non adeguatamente gestito.

Generalmente, i processi di recupero sviluppati prevedono 3 fasi principali (Figura 63):

1. un *pretrattamento*, cioè una prima separazione manuale/meccanica dei componenti e rimozione delle fonti di pericolo
2. un *trattamento secondario* per separare il materiale attivo dai supporti degli elettrodi (principalmente leaching acido),
3. il *recupero e la purificazione* dei materiali costituenti la batteria, quali Cu, Al, Fe, Co, Li, Ni, Mn, C e plastica; solo Fe, Cu e Al sono recuperati nel loro stato elementare, mentre gli altri in forma combinata.

Dall'analisi della letteratura emerge anche che l'approccio tecnologico al trattamento delle batterie vede principalmente sviluppata l'idrometallurgia (57%), mentre la pirometallurgia si mantiene intorno al 17%, molto sviluppati anche i trattamenti meccanici, soprattutto per la prima fase del processo; notevolmente diffusi anche i processi che prevedono l'uso combinato di diverse tipologie di tecnologie.

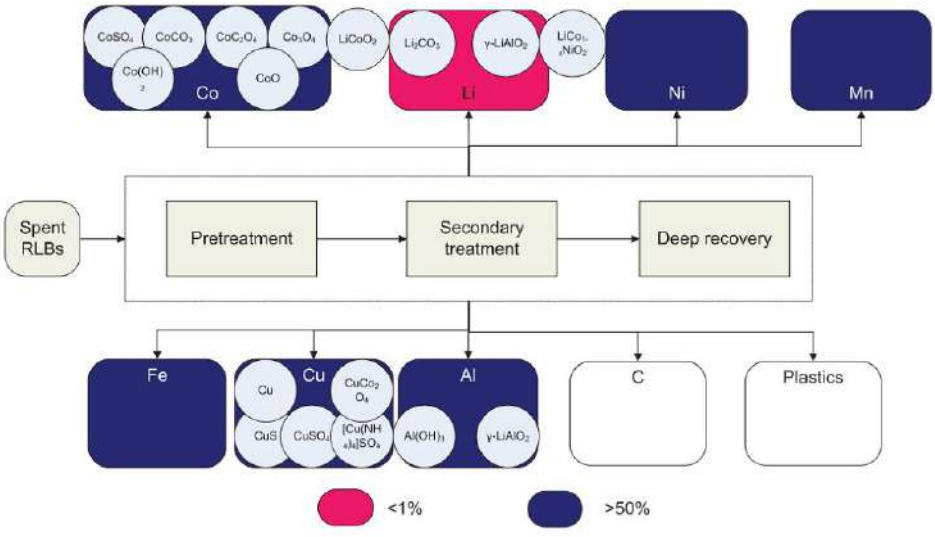


Figura 63. Processo completo di riciclo dei LIBs

L'ultima fase del processo di recupero prevede la separazione finale e purificazione dei metalli di interesse; tra le tecniche più utilizzate si possono annoverare: estrazione con solvente (Cyanex 272, PC-88A, Ionquest 801, Acorga M5640, DEHPA), precipitazione selettiva (ossalato, carbonato), electrowinning, cristallizzazione e calcinazione, ed eventuali loro combinazioni.

Processo idrometallurgico per il recupero di materiale da batterie al litio esauste

Per il recupero di materiale da batterie al litio esauste si propone un processo di tipo idrometallurgico. I vantaggi associati alla idrometallurgia, si possono così riassumere:

- alta selettività → elevata purezza dei prodotti finali
- recupero efficiente di metalli contenuti in basse concentrazioni
- operazioni condotte prevalentemente a temperatura ambiente ed a circuito chiuso
- costi energetici e di esercizio contenuti
- limitate emissioni in atmosfera
- flessibilità e modularità degli impianti.

Confrontando questa tipologia di processo con la pirometallurgia e la biometallurgia, si rileva come la processistica idrometallurgica sia più esatta, e più facilmente controllabile. È caratterizzata da impatti ambientali di minore entità rispetto alla pirometallurgia da efficienza maggiore, da tempi di reazione minori e volumi ridotti rispetto alla biometallurgia.

Nello studio si fa riferimento a batterie al $LiFePO_4$. Polvere di $LiFePO_4$ commerciale (Gelon LIB Co.) è stata dapprima caratterizzata per il suo contenuto in metalli e quindi sono state condotte prove di cessione secondo la normativa europea (EN-12457-2) e con acido acetico, per stimare il possibile rilascio di sostanze pericolose, che potrebbe verificarsi in particolare nelle fasi critiche di stoccaggio, il trasporto e l'eventuale processo di riciclo del materiale.

Prima di avviare le batterie esauste al recupero per via idrometallurgica, le stesse sono sottoposte ad un pretrattamento che consiste nel disassemblaggio e separazione dei componenti; a queste fasi segue un attacco acido per portare in soluzione tramite lisciviazione i metalli di interesse. La lisciviazione acida è il metodo più diffuso per ottenere la separazione completa del materiale attivo dai supporti catodici e anodici in idrometallurgia, dopo pre-trattamento fisico.

L'efficacia del processo e dunque il tasso di leaching dei metalli, dipende da molti fattori quali: la concentrazione dell'acido, temperatura, tempo di reazione e rapporto solido-liquido. I lisci vianti possono suddividersi in acidi convenzionali: HCl, HNO_3, H_2SO_4 e acidi organici quali l'acido citrico e ossalico che assume anche il ruolo di reattivo precipitante, ad esempio per il Co. Gli acidi organici come agenti lisci vianti come anche il malico, l'ascorbico e l'aspartico sono recentemente oggetto di studio in quanto rappresentano un alternativa a minor impatto ambientale degli acidi forti il cui uso implica una fonte di inquinamento secondaria.

Allo scopo di migliorare l'efficienza e l'impatto ambientale del processo di lisciviazione è stata studiata l'applicazione degli ultrasuoni allo scopo di accorciare i tempi di reazione e permettere l'utilizzo di concentrazioni di acido minori.

Le soluzioni provenienti dalla lisciviazione, dopo filtrazione sotto vuoto e opportuna diluizione, sono state analizzate tramite spettrofotometria per assorbimento atomico per gli elementi Li e Fe. I risultati delle prove eseguite sono riportati nella Tabella 23.

Tabella 23. Risultati delle prove di lisciviazione

Condizioni sperimentali	Agente lisciviante	Peso iniziale, g	Litio			Ferro		
			mg lisciv.	mg/g	% lisciv.	mg lisciv.	mg/g	% lisciv.
I prova 6h no US, T 25°C	HCl	2,0073	84,65	42,17	91,7	707,55	352,48	88,2
	HNO_3	2,0111	86,22	42,87	93,2	674,15	335,21	84,0
	H_2SO_4	2,0139	84.08	41.75	90.8	615,20	305,47	76,7
	Ac.citrico	2,0095	40,23	20,02	43,5	268,8	133,75	33,5
II prova 6h con US, T 75°C	HCl	2,0100	86,10	42,83	93,1	712,75	354,60	88,6
	HNO_3	2,0611	86,73	42,07	91,45	733,90	356,06	89,0
	H_2SO_4	2,0352	81,28	39,91	86,8	624,35	306,76	76,6
	Ac.citrico	2,0351	31,03	15,22	33,2	222,90	109,55	27,3
III prova 2h no US, T 25°C	HCl	2,0125	89,62	44,53	96,8	713,85	354,71	88,7
	H_2SO_4	2,0161	90,20	44,73	97,3	569,80	282,59	70,6
IV prova 2h con US, T 75°C	HCl	2,0092	87,42	43,50	94,6	656,25	326,62	81,7
	H_2SO_4	2,0097	93,08	46,32	98,35	587,95	292,55	73,1

Le prime prove con tempo di lisciviazione pari a 6 ore sono state condotte con tutti e 4 gli acidi selezionati; quindi, visti i buoni risultati ottenuti, con percentuali di lisciviazione fino al 93% per il litio e 89% per il ferro, si è ritenuto opportuno ridurre il tempo di lisciviazione a 2 ore: Questa seconda serie di prove è stata condotta con i soli acido cloridrico e solforico, in quanto l'acido nitrico a contatto con il $LiFePO_4$, sviluppa vapori pericolosi (ossidi di azoto) che rendono difficoltoso lo svolgimento della prova, mentre l'acido citrico non è stato selezionato in virtù delle basse percentuali di resa ottenute per entrambi i metalli.

Dall'analisi dei risultati emergono differenze che seppure non rilevanti possono essere significative; in particolare a tempi minori, si nota come le percentuali di lisciviazione aumentino fino alla quasi completa dissoluzione del litio, per il quale non fa molta differenza l'uso dell'acido cloridrico o solforico come non sembrano avere effetto gli ultrasuoni; per il ferro, si vede come l'HCl dà risultati migliori e inoltre l'uso degli ultrasuoni sembra deprimere la lisciviazione di questo metallo.

Per concludere i risultati delle prove preliminari di lisciviazione sulla polvere commerciale di $LiFePO_4$ sono risultati molto promettenti in quanto dimostrano come dopo solo due ore si può ottenere a temperatura ambiente la quasi totale dissoluzione del litio in essa contenuto (resa maggiore del 95%); ulteriori prove verranno condotte per verificare se con tempi minori si possa ottenere una ulteriore significativa percentuale di lisciviazione, in questo caso probabilmente l'utilizzo degli ultrasuoni potrebbe essere determinante; è importante anche considerare a proposito dell'uso degli ultrasuoni, che in virtù delle elevate P e T che si originano dal fenomeno della cavitazione, questi possono essere impiegati anche nella separazione del materiale catodico dal supporto in Al delle batterie, quindi si potrebbe proporre un processo in cui pretrattamento e lisciviazione sono condotti in un unico step, con evidenti vantaggi di tipo tecnico e ambientale.

Per quanto concerne l'acido da impiegare nel processo il miglior candidato sembra essere l'acido cloridrico che mostra buoni risultati sia per il litio che per il ferro; l'acido citrico invece, dovrà essere ulteriormente investigato le basse percentuali di lisciviazione (minori del 40%) rilevate potrebbero essere collegate ad un fenomeno di precipitazione del citrato di litio e dunque si potrebbe aprire un interessante scenario in cui gli step di lisciviazione e precipitazione del litio diventano in realtà uno solo, evitando quindi di aggiungere un ulteriore reattivo precipitante.

Una volta stabilite le condizioni ottimali di lisciviazione, l'attività in corso prevede lo sviluppo di un processo per il trattamento delle batterie esauste secondo lo schema riportato in Figura 64.

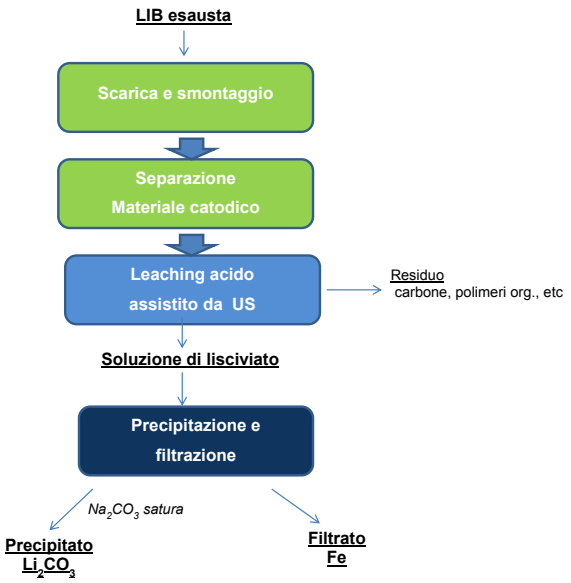


Figura 64. Schema del processo di trattamento proposto

Il processo proposto per il recupero del materiale catodico di batterie $LiFePO_4$, prevede un pretrattamento di scarica della batteria per prevenire corto-circuito e auto-combustione, quindi, come per altri rifiuti elettronici le batterie devono essere sottoposte a disassemblaggio e separazione dei componenti, sia in maniera meccanica che manuale, in quanto le stesse sono coperte o incapsulate da un guscio metallico o in plastica che generalmente viene rimosso.

Dopo lisciviazione acida, eventualmente assistita da ultrasuoni, il litio viene recuperato per precipitazione, aggiungendo una soluzione satura di carbonato di sodio alla miscela proveniente dallo stadio di lisciviazione, il tutto a temperatura prossima a 100°C; si recupera così circa l'80% di Li, il cui precipitato mostra generalmente elevata purezza. Il ferro fosfato rimasto nella soluzione potrà essere recuperato ed eventualmente utilizzato ad esempio per scopi agricoli.

Per testare l'efficacia e la fattibilità tecnico-economica del processo proposto si dovranno in futuro trasferire i risultati ottenuti ad un caso reale.

Per maggiori informazioni sulle tecnologie di recupero di materiali da batterie al litio disponibili e sul processo di recupero proposto nel presente studio si rimanda ai rapporti RdS/PAR2013/195 e RdS/PAR2013/196.

d.4 Valutazione del ciclo di vita (LCA) delle batterie al litio e degli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi idrometallurgici per il recupero di materiali

Al fine di agevolare la scelta del processo di cui al punto d.3, è stata effettuata la valutazione del ciclo di vita (LCA) sulle batterie al litio tenendo conto degli attuali standard tecnologici, di produzione, di fase di uso e di fine vita (incluso il trattamento), cui gli attuali modelli di batterie al litio vengono sottoposti (scenario base). Inoltre, in affiancamento alla fase di sperimentazione di cui al punto d.3. sono stati valutati i principali aspetti ambientali che possono eventualmente scaturire dai nuovi processi di trattamento di tipo idrometallurgico.

Valutazione del ciclo vita

L'attività svolta dall'ENEA si è concentrata sulla valutazione di ciclo di vita di batterie al litio con l'analisi della metodologia fino ad oggi utilizzata [rapporto RdS/PAR2013/197].

È stata svolta una valutazione LCA finalizzata a stimare le prestazioni ambientali della produzione di una batteria agli ioni litio, condotta con il software SimaPro 8[9] e database Ecoinvent 3[10]. Per la valutazione degli impatti è stato utilizzato il metodo IMPACT 2002+ e l'unità funzionale di riferimento è pari ad 1 kg di batterie al litio. Il dato scelto come rappresentativo nel database Ecoinvent 3 include: catodo, anodo e un separatore. Le celle sono divise da un elettrolita (LiPF6 in etilencarbonato) in atmosfera inerte e provviste di imballo in polietilene. Si tiene conto della quota parte per le infrastrutture e dei trasporti, basandosi su stime e standard presenti nel database scelto.

La categoria di impatto verso la quale si manifesta il maggiore contributo di impatto è quella della salute umana. Nella valutazione LCA sono mostrati gli impatti in fase di normalizzazione per categoria di impatto e di danno e per punteggio singolo (categorie di impatto e di danno), valutati secondo il metodo IMPACT 2002+ che consente di effettuare l'analisi midpoint (in 14 categorie di impatto) ed endpoint (in 4 categorie di danno) nonché una ulteriore valutazione effettuata con il metodo ReCiPe.

La procedura di LCA si compone di quattro fasi (in base alla norma ISO 14040, in Figura 65):

1. *Definizione degli scopi e degli obiettivi* (Goal and Scope Definition): è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno e l'affidabilità dei dati, le assunzioni e i limiti.
2. *Analisi di Inventario* (Life Cycle Inventory Analysis, LCI): è la parte del lavoro dedicata allo studio del ciclo di vita del processo o attività; lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto. Redigere un Inventario di ciclo vita significa pertanto costruire il modello analogico del sistema reale che si intende studiare.
3. *Analisi degli impatti* (Life Cycle Impact Assessment, LCIA): è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività, che ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei rilasci nell'ambiente e dei consumi di risorse calcolati nell'Inventario. È questa la fase in cui si produce il passaggio dal dato oggettivo calcolato durante la fase di Inventario al giudizio di pericolosità ambientale.

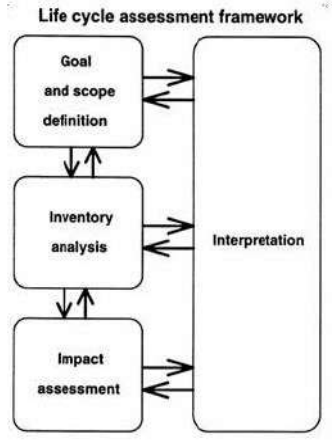


Figura 65. Fasi e applicazioni della LCA (ISO 14040, 2006)

[9] http://www.pre-sustainability.com/simapro
[10] http://www.pre-sustainability.com/ecoinvent-high-quality-lci-database-integrated-in-simapro

4. *Interpretazione e Miglioramento* (Life Cycle Interpretation): è la parte conclusiva di una LCA, che ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati, valutandoli in maniera iterativa con la stessa metodologia LCA.

Le norme ISO definiscono l'LCA come una *compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema prodotto*. Questo quadro di riferimento, sebbene sia essenziale, lascia tuttavia una certa libertà su di una serie di scelte, che possono incidere sulla legittimità dei risultati. Per rispondere a queste esigenze e per armonizzare la metodologia è stato creato l'International Life Cycle Data System Reference (ILCD), che afferisce all'Istituto per l'Ambiente e la Sostenibilità, all'interno del Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea. L'International Reference Life Cycle Data System ha rilasciato l'Handbook ILCD (JRC, 2010), che raccoglie serie di documenti tecnici che forniscono una guida, supportata da modelli e strumenti, delle procedure raccomandate nella LCA.

Nello studio LCA, la valutazione degli impatti ambientali è stata svolta utilizzando il metodo IMPACT2002+[11] in quanto consente di valutare gli effetti in linea con l'obiettivo dello studio. IMPACT 2002+ combina 4 metodi: IMPACT 2002, Eco-indicator 99 (seconda versione, Egalitarian Factors), CML e IPCC. Vengono sviluppati nuovi concetti relativamente alla tossicità umana e l'ecotossicità che si basano su risposte medie piuttosto che su assunzioni conservative; le categorie di danno sono implementate per i carcinogeni e i non-carcinogeni grazie a miglioramento di stime di frazioni di intake e curve di dose-risposta.

Questo metodo propone un approccio di uso combinato di impatti midpoint e di valutazione del danno correlando tutti I flussi dell'inventario a 14 categorie di impatto (midpoint, ovvero con modellizzazione ristretta ai primi stadi nella catena causa-effetto) e 4 categorie di danno,

Infine il risultato può essere espresso in termini di ecopunto complessivo finale. Per le varie categorie d'impatto si fa riferimento sostanzialmente ad una unità di misura che si esprime come "kg eq substances" ovvero la quantità di una sostanza di riferimento necessaria per eguagliare l'impatto di un certo inquinante. Inoltre, ciascuna categoria è poi inclusa nelle categorie di danno di salute umana (espressa in DALY, Disability Adjusted Life Years), qualità dell'ecosistema (espressa in PDF, potential disappeared species), cambiamento climatico (espressa in kg CO_2) e risorse (espressa in MJ).

In Figura 66 si può osservare il diagramma di flusso che, fatto 100 l'impatto generato dalla produzione della batteria, ripartisce la responsabilità di questo impatto tra le varie componenti che contribuiscono alla realizzazione del prodotto nel suo complesso. Dalla figura si ricava che gli impatti associati alla produzione dell'anodo sono pari al 60% rispetto all'impatto totale e che invece l'anodo contribuisce all'impatto per circa il 24%.

valutazione di impatto, effettuata usando il metodo IMPACT 2002+, è risultato che la categoria che risente degli impatti maggiori è quella delle patologie respiratorie associate a inalazione di sostanze inorganiche, che va a fornire un forte contributo alla categoria di danno della salute umana. Gli impatti sono dovuti al processo di produzione del rame, necessario per l'anodo, seguito dagli impatti per il consumo energetico. La categoria della salute umana risulta prevalente rispetto alle altre. Per la categoria dei cambiamenti climatici, gli impatti sono associati al consumo energetico (come spesso avviene in tale categoria). Il risultato complessivo della valutazione in termini di ecopunto se effettuato secondo il metodo ReCiPe mostra risultati non corrispondenti dal momento che il consumo di risorse risulta la categoria di danno maggiormente colpita, seguita dagli impatti sulla salute umana. Tale risultato, come accennato, dipende dai vari fattori di caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione che vengono utilizzati nei due metodi che possono portare a risultati anche non coincidenti, però partendo sempre dagli stessi dati di impatto complessivi. L'utilizzo di due metodi di valutazione può servire per valutare la sensibilità del risultato, posto che l'ecopunto finale non costituisce IL risultato della LCA ma consente solo di avere una sua rappresentazione di sintesi (che contiene al suo interno tutte le assunzioni, le ipotesi e le scelte via via fatte durante lo svolgimento dello studio).

Nel caso delle batterie al litio inoltre, la letteratura scientifica così come i dati secondari disponibili nelle banche dati, non consente di avere uno storico sufficiente a dare stabilità ai risultati, né sono ancora disponibili linee guida per la realizzazione di studi di LCA mirati verso questo gruppo di prodotti.

[11] O. Jolliet,O. Margni, R. Charles, S .Humbert , j. Payet, G. Rebitzer, R. Rosenbaum (2003). IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. International Journal of Life Cycle Assess 8 (6), 324-330

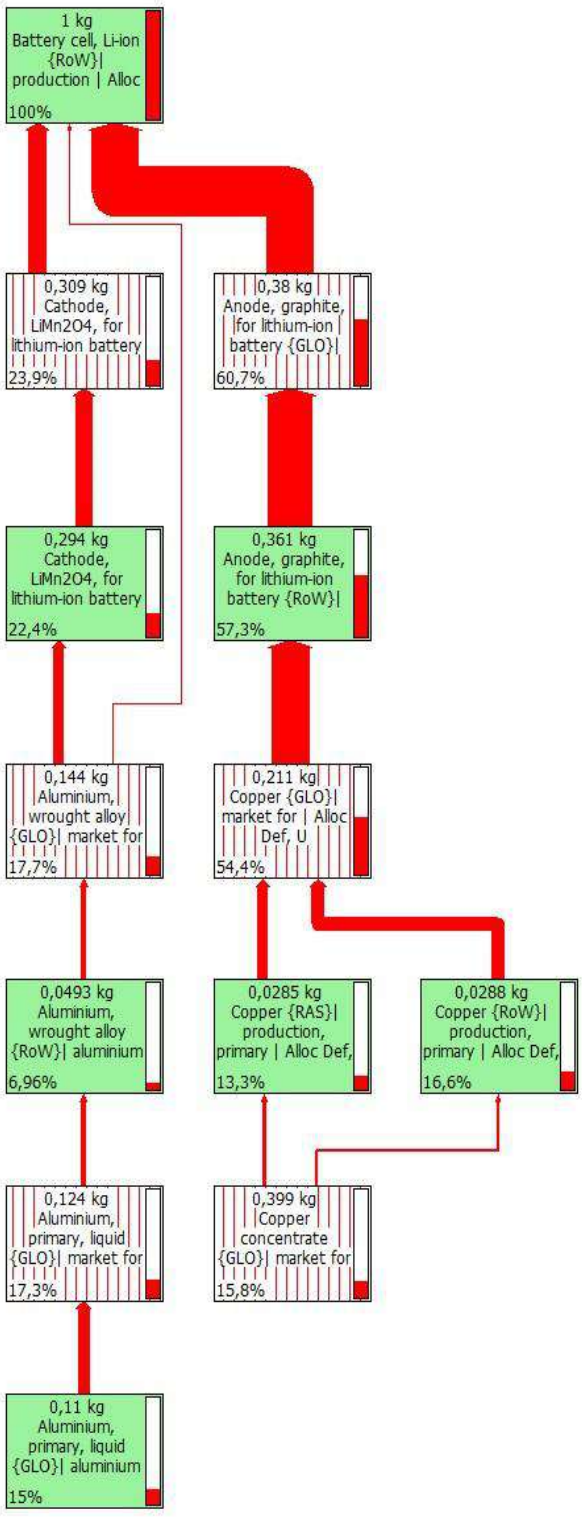


Figura 66. LCA della produzione di una batteria al litio: contributo percentuale dei processi per l'impatto complessivo (metodo IMPACT 2002+)

Aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita

L'ENEA ha poi analizzato il potenziale impatto sull'ambiente e sulla salute di una non corretta gestione delle batterie esauste come rifiuto, con particolare riferimento a quelle agli ioni litio, considerando i vari componenti della batteria e i singoli composti presenti.

Attualmente i processi di riciclaggio mirano principalmente al recupero dei metalli, ma dovrebbero essere presi in considerazione anche i componenti organici della batteria, quali l'elettrolita e la plastica, in quanto un loro recupero può contribuire ad aumentare l'efficienza del processo; si tratta in pratica di seguire l'approccio integrato prodotto-centrico che consente il recupero di diversi materiali da uno stesso prodotto permettendo così la sostenibilità economica ed ambientale delle tecnologie di recupero a basso impatto ambientale.

Il recupero delle batterie al litio è diventato sempre più importante a causa della necessità di uno smaltimento sicuro che può diventare un problema serio a causa della presenza di elementi o composti infiammabili e tossici e, allo stesso tempo, anche a causa dei benefici economici che possono ottenersi dal recupero dei metalli presenti (Co, Li, Mn e Ni) o loro composti.

Nello studio sono state analizzate le caratteristiche principali delle tecnologie di recupero attualmente disponibili, evidenziandone le differenze e i benefici ambientali in relazione a nuovi processi di tipo idrometallurgici.

I processi pirometallurgici includono: incenerimento, fusione in forni al plasma ad arco o in altoforni e sinterizzazione. Le reazioni in fase gas ad alta temperatura sono considerate un metodo tradizionale per recuperare metalli non ferrosi e metalli preziosi da rifiuti elettronici. Il processo consiste nel bruciare in un forno o in un bagno fuso gli scarti frantumati in modo da rimuovere le materie plastiche. La maggior parte dei metodi che utilizzano una processistica pirometallurgica dei rifiuti elettronici danno però origine ai seguenti limiti:

1. nelle fonderie non è possibile recuperare alluminio e ferro come metalli;
2. la presenza di ritardanti di fiamma alogenati nell'alimentazione può portare alla formazione di diossine. È quindi necessaria la presenza di impianti e di misure speciali di trattamento fumi;
3. le componenti in ceramica e in vetro aumentano la quantità di scorie. Di conseguenza aumenta anche la perdita di metalli preziosi e di metalli di base;
4. il recupero di energia e l'utilizzo di componenti organici come riducenti sono tecnologie utilizzate ancora molto raramente in questo campo;
5. la separazione dei metalli che può essere ottenuta mediante pirometallurgia è solo parziale, fatto che si rispecchia in un limitato miglioramento del valore del metallo. Inoltre sono spesso necessari ulteriori trattamenti idrometallurgici e/o elettrochimici.

I processi pirometallurgici comportano infine un enorme dispendio energetico necessario per il raggiungimento di elevate temperature di processo (oltre 1000 °C).

I processi idrometallurgici consistono in una serie di lisciviazioni acide o alcaline di materiale solido. Le soluzioni sono poi sottoposte a procedure di separazione e purificazione completate tramite operazioni che riescono ad isolare e concentrare i metalli di interesse; tali operazioni sono:

- precipitazione/cristallizzazione;
- scambio ionico;
- estrazione con solvente;
- elettrodeposizione.

Per quanto riguarda la biometallurgia, negli ultimi anni il recupero di metalli mediante questa tecnologia è stato sempre maggiormente considerato e la comprensione dei processi biochimici coinvolti nel trattamento dei metalli è stato oggetto di sempre più indagini. Le ricerche attualmente in corso sono relative al recupero di numerose terre rare, di rame, nichel, cobalto, zinco, oro e argento. Nel recupero di oro e argento, tuttavia, l'attività dei batteri liscivianti è limitata alla rimozione, prima del trattamento idrometallurgico di cianurazione, dei solfuri metallici dai minerali contenenti i metalli preziosi.

La biometallurgia si distingue in due aree principali: la biolisciviazione ed il bioassorbimento. La biolisciviazione è stata applicata con successo nel recupero di metalli da solfuri metallici mediante reazioni battericamente assistite. L'estrazione di metalli come Co, Mo, Ni, Pb e Zn da minerali sulfurei mediante biolisciviazione è quindi tecnicamente fattibile anche se, ad oggi, solo rame ed oro sono prodotti industrialmente in questo modo in proporzioni significative. Il bioassorbimento è un processo in cui possono essere utilizzati sia organismi viventi sia non‐viventi: è infatti un'interazione passiva fisico‐chimica tra i gruppi superficiali carichi del microrganismo e gli ioni in soluzione. Numerosi microrganismi, compresi alghe, batteri, lieviti e funghi, sono noti per la loro capacità di accumulare attivamente metalli pesanti e metalli preziosi. Un processo basato sul bioassorbimento offre una serie di vantaggi rispetto ai metodi convenzionali: bassi costi di gestione, minimizzazione del volume di sostanze chimiche e/o di fanghi biologici da manipolare ed alta efficienza nella decontaminazione degli effluenti.

Tra le diverse tipologie di processo per il trattamento di batterie al litio a fine vita, la più opportuna sembra essere l'idrometallurgia; infatti, confrontando quest'ultima tipologia di processo con la pirometallurgia e la biometallurgia, si rileva come la processistica idrometallurgica sia più flessibile, selettiva e controllabile. È inoltre

caratterizzata da impatti ambientali di minore entità rispetto alla pirometallurgia e da efficienza maggiore, da tempi di reazione minori e volumi ridotti rispetto alla biometallurgia.

In conclusione, lo studio della letteratura al momento presente sugli impatti ambientali dovuti ad un non corretto smaltimento delle batterie al litio esauste, sottolinea l'importanza del loro recupero, al fine di ottenere non solo benefici economici per il recupero di importanti materiali critici, ma anche benefici ambientali in termini di conservazione delle risorse e prevenzione dell'inquinamento.

e. Partecipazione a collaborazioni internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati

L'aggiornamento, la verifica e la diffusione delle attività di ricerca e dei risultati sperimentali ottenuti avvengono tramite la partecipazione diretta ad organismi internazionali, che sono fonte continua di informazioni aggiornate sulle attività di ricerca e sviluppo nel campo dei sistemi di accumulo e delle relative applicazioni, e la presentazione di tali risultati mediante comunicazioni a convegni selezionati e la pubblicazione su riviste nazionali ed internazionali.

e.1 Partecipazione a collaborazioni internazionali

L'ENEA rappresenta l'Italia in diverse collaborazioni internazionali, spesso su esplicita richiesta da parte di diversi Ministeri. Queste attività di collaborazione rientrano in iniziative in ambito europeo ed internazionale in cui sono stati creati gruppi di lavoro e alleanze, per favorire una maggiore integrazione e confronto dei programmi nazionali di ricerca, sviluppo e diffusione delle diverse tecnologie dell'accumulo per le varie applicazioni stazionarie e mobili.
Inoltre è aumentato l'impegno a livello internazionale nella messa a punto e nell'aggiornamento di norme specifiche per le diverse applicazioni delle varie tipologie di accumulo elettrochimico. Queste attività di supporto sulla normativa, all'interno di diversi Comitati Tecnici degli organismi di normazione nazionali (CEI, CTI) e internazionali (CENELEC, IEA e ISO) sulle tematiche dell'accumulo, non sono tuttavia comprese tra gli impegni e le attività svolte nella Ricerca di Sistema.
Nel seguito quindi verranno presentate le attività svolte nel periodo ottobre 2013 - settembre 2014 nel quadro delle seguenti collaborazioni:

1. IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia)
    a. CERT
    b. IA ECES (Energy Conservation through Energy Storage)
2. EERA (European Energy Research Alliance)
    a. Joint Programme (JP) Energy Storage
    b. JP Smart Grids
3. COST (Scientific and Technological Cooperation)
    a. MP1004 "Hybrid-ES – Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications"

IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia)

L'ENEA rappresenta da diversi anni l'Italia in numerosi Accordi di Cooperazione tecnologica (Implementing Agreement). Nell'ultimo anno, la partecipazione alle iniziative IEA 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, relative all'accumulo per le reti elettriche, sono state, con esclusione di quella riguardante la trazione elettrica ed ibrida con l'accumulo, le seguenti:

- Partecipazione al CERT
- Partecipazione all'Implementing Agreement (IA) "Energy Conservation through Energy Storage" (ECES)

Il lavoro descritto qui di seguito è stato svolto esclusivamente dall'ENEA con rappresentanti di diverse Unità del Centro Ricerche ENEA della Casaccia.

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 (IA, Accordi governativi sui vari temi legati all'energia), inclusi quelli sull'accumulo elettrico. ENEA partecipa alle riunioni come membro italiano.

Nel periodo 1 ottobre 2013-30 settembre 2014 l'ENEA ha partecipato, presso la sede IEA a Parigi, ad una serie di riunioni del Comitato, nel corso delle quali tra l'altro, è continuata la discussione sulla nuova Roadmap "Energy Storage", resa pubblica sul sito IEA il 19 marzo 2014.

In parallelo, a livello nazionale, è proseguita con il Ministero dello Sviluppo Economico, l'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", che era stata avviata nell'annualità precedente. 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.

IA ECES (Energy Conservation through Energy Storage)

L'Implementing Agreement su "Energy Conservation through Energy Storage", è stato avviato nel 1978 e nel 2011 è stato prorogato per altri 5 anni, a seguito dell'approvazione della strategia di intervento dell'Agreement, approvata dagli organi di governo IEA.
Partecipano attualmente 15 paesi più tre osservatori/sponsor (Olanda, Polonia e Spagna), con un impegno limitato ma costante in termini di scambio di informazioni e collaborazioni tra varie agenzie governative ed enti pubblici e privati dei diversi paesi (Belgio, Canada, Cina, Corea del Sud, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Giappone, Italia, Norvegia, Slovenia, Svezia, Turchia e USA).
L'Italia ha ripreso la sua posizione di membro effettivo, rappresentato dall'ENEA, nel 2011, per l'aumentato interesse sull'accumulo elettrico e per la presenza di partecipanti italiani in vari Task nel passato, e più recentemente dell'Università di Bologna nel Task 21, che è in fase di prosecuzione come nuovo Task.
Gli Annessi attualmente attivi sono i seguenti:

- Annex 21 Thermal Response Test (TRT), il cui rapporto finale è stato approvato a Maggio 2014
- Annex 22 Thermal Energy Storage for greenhouses
- Annex 23 Applying Energy Storage in Ultra-low Energy Buildings
- Annex 24 Material Development for Improved Thermal Energy Storage Systems
- Annex 25 Surplus Heat Management using Advanced TES for CO_2 mitigation
- Annex 26 Electric Energy Storage: Future Energy Storage Demand
- Annex 27 Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Thermal Energy Storage Systems (in fase di avvio)
- Annex 28 Distributed Energy Storage for the Integration of Renewable Energies (DESIRE) (avviato 2014)
- Annex 30 TES for Cost-effective Energy Management and CO_2 Mitigation
- Annex 31 Energy storage with Net Zero Energy Buildings and Districts: Optimization and Automation (avviato 2014).

L'impegno ENEA è stato focalizzato sulla partecipazione alle attività del Comitato Esecutivo e a quelle del Task 26, che riguarda l'Accumulo Elettrico, mentre gli altri Task sono tutti concentrati sull'accumulo termico, per applicazioni diverse. Un maggiore coinvolgimento ENEA è in fase di valutazione per tener conto delle competenze e degli impegni di diverse Unità tecniche e laboratori ENEA. Inoltre nuove possibilità per l'accumulo in diversi campi di applicazione sono stati esaminati negli ultimi Comitati Esecutivi e sono oggetto di discussione per nuovi Task, anche congiunti con altri IA.
È stata preparata dall'IEA una roadmap sull'accumulo di energia, pubblicata a marzo 2014. Il contributo ENEA è avvenuto sia tramite i vari IA più direttamente interessati all'accumulo che tramite la Roadmap, preparata da EASE/EERA a supporto del SET Plan della CE, pubblicata ad aprile 2013, l'ENEA ha contribuito prevalentemente sui capitoli relativi alle batterie ed ai supercondensatori.

EERA (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 (European Energy Research Alliance). 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 complementarietà e le sinergie.
In EERA sono stati lanciati già 15 programmi comuni (JP - Joint Programme), ed altri sono in fase di avvio, su temi di interesse energetico, tra cui l'accumulo, l'idrogeno e le celle a combustibile e le smart grids (nel quale è stata svolta soltanto un'attività di supporto nell'individuazione delle norme esistenti sull'accumulo per applicazioni stazionarie).
Ad aprile 2014, l'EERA ha cambiato natura sociale, trasformandosi da alleanza su base volontaria in un organismo internazionale (EERA AISBL = Associazione Internazionale Senza Fini di Lucro), che mira a consentire un accesso diretto alle opportunità di finanziamento offerte dalla CE e dai vari Programmi Quadro, tra cui Horizon 2020.

Nel novembre 2011 è stato approvato il JP "Accumulo dell'Energia", ufficialmente avviato a febbraio 2012. Attualmente a questo JP partecipano oltre 40 organizzazioni di ricerca europea (da 16 paesi), che mettono insieme un potenziale di ricerca di circa 500 anni-ricercatore/anno. Questo JP è suddiviso in sei SP (Sottoprogrammi):

1. Accumulo Elettrochimico (batterie e supercondensatori), coordinato dall'Italia.
2. Accumulo Chimico, (idrogeno, metanolo, ammoniaca), coordinato dalla Francia.
3. Accumulo Termico (Fluidi avanzati, materiali a transizione di fase, accumulo termochimico), coordinato dalla Germania.
4. Accumulo meccanico (pompaggio d'acqua, volani ed aria compressa), coordinato dalla Norvegia.
5. SMES (Accumulo in magneti superconduttori), coordinato dalla Germania.
6. Analisi tecnico-economiche sull'accumulo, coordinato dal Regno Unito.

L'ENEA svolge il ruolo di coordinatore dell'SP "Accumulo Elettrochimico", il maggiore dei 6 SP in termini di partecipazione e di potenziali risorse di ricerca, che vede la partecipazione di circa 30 organizzazioni di ricerca europee (di cui 5 italiane con altre 3 in fase di adesione). ENEA partecipano anche agli SP Accumulo Termico ed Accumulo Chimico.

Nella primavera 2014, il JP ES è stato sottoposto a revisione da parte di una terna di esperti internazionali, che hanno valutato positivamente l'intero JP ed ogni singolo SP. La valutazione ha richiesto un continuo supporto agli esperti da parte dei coordinatori dei vari SP con la partecipazione a teleconferenze e la preparazione di brevi documenti o sintesi delle attività svolte e programmate, che hanno poi portato ad un documento di valutazione finale, ufficialmente presentato all'assemblea generale che si è tenuta nell'aprile 2014.

In sintesi, oltre all'intensa attività di coordinamento, con numerosi contatti con i partecipanti ed organizzazioni dell'SP "Accumulo Elettrochimico", sono stati ottenuti i seguenti interessanti risultati:

1. Preparazione di un Progetto di Infrastruttura Europea sull'Accumulo Elettrochimico "European Electrochemical Storage Testing and Simulation Integrating Activity" (EESTESIA) di circa 5 M€ di budget e con la partecipazione di 10 organizzazioni di ricerca europee, presentata il 2 settembre 2014 ed ora di fase di valutazione.
2. Organizzazione di 2 riunioni dello SP "Accumulo Elettrochimico" a Karlsruhe a novembre 2013 ed a Bruxelles, presso la sede dell'ENEA, a giugno 2014. La partecipazione a queste riunioni ha anche richiesto la preparazione di presentazioni sullo stato delle varie attività.
3. Le due riunioni di SP sono state organizzate congiuntamente alle Assemblee Generali del JP Energy Storage.
4. Tra le principali attività di largo interesse anche nazionale svolte all'interno dell'EERA, anche in supporto al Delegato Nazionale per il Work Programma "Energia", è da ricordare il contributo dato alle numerose revisioni delle bozze delle roadmap integrate del SET Plan.

Azione COST MP 1004 "Hybrid-ES – Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications"

Il COST (European Cooperation in Science and Technology) è un network intergovernativo di collaborazione europea in Scienza e Tecnologia, che consente il coordinamento a livello europeo della ricerca finanziata nei vari paesi. COST assiste la Commissione europea nella costruzione dell'Area europea di ricerca (ERA), anticipando e integrando le attività dei Programmi Quadro dell'Unione Europea, mediante la costruzione di un ponte virtuale tra le comunità scientifiche di vari paesi. Operativamente, il COST è gestito dalla European Science Foundation.

Nell'ambito del network COST, è stata avviata nel maggio del 2011 una nuova Azione di collaborazione sui dispositivi di accumulo ibridi (batterie e supercondensatori) per applicazioni mobile e stazionarie, a cui partecipano 23 nazioni. L'ENEA, insieme al CNR, è stata designata ufficialmente dal Ministero della Ricerca (MIUR) a rappresentare l'Italia nel Comitato di Gestione e nelle attività di collaborazione che conta 41 Membri (+ 18 sostituti) in rappresentanza di 21 paesi europei.

L'obiettivo principale di quest'azione è quello di fornire la conoscenza scientifica e tecnologica per sviluppare sistemi di accumulo ibridi innovativi e di fornire un sufficiente supporto scientifico e tecnologico per la loro diffusione. L'Azione è divisa in 4 gruppi di lavoro (WG) che partono dai materiali fino ad arrivare allo studio delle applicazioni.

L'impegno ENEA ha riguardato le attività di coordinamento e gestione dell'intera azione e della partecipazione ad alcune iniziative tecniche di scambio di informazione e di definizione di collaborazioni in ambito europeo nei vari gruppi di lavoro. Infine è stata avviata, tra le pubblicazioni già previste, la realizzazione di un rapporto tecnico "Toward Energy Efficiency by Hybrid Storage Solution and their Applications" entro il 2015.

e.2 Comunicazione e diffusione dei risultati

In questa sezione si descriverà quanto fatto per la diffusione dei risultati (giova ribadire che le attività di ricerca in oggetto hanno carattere di ricerca fondamentale, a totale beneficio di tutti gli utenti del sistema elettrico, e che l'ENEA è tenuto a provvedere alla diffusione delle attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Accordo di Programma); si riportano in questa sezione anche le pubblicazioni su rivista e le presentazioni a congressi e convegni.

Le attività di comunicazione e diffusione dei risultati sono state numerose e diversificate per presentare adeguatamente i risultati ottenuti dal progetto accumulo nella Ricerca di Sistema, e hanno riguardato:

1. Contributi a pubblicazioni e studi europei ed internazionali
2. Presentazioni a convegni anche in ambito europeo,
3. Pubblicazioni su riviste scientifiche.

Queste azioni hanno anche consentito di confrontare e valutare il livello e la qualità delle attività svolte e dei risultati raggiunti e di allineare al meglio i contenuti del progetto.

L'ENEA ha creato le condizioni ed avuto la possibilità di comunicare e diffondere i risultati delle ricerche condotte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, attraverso contributi alla redazione di documenti strategici ed alla presentazione di memorie in vari convegni nazionali ed internazionali, e attraverso alcune pubblicazioni in riviste scientifiche internazionali.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Bologna, Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician"

L'Università di Bologna ha collaborato con ENEA nei subtask a.1 e a.2, proseguendo le attività sulla scelta e l'ottimizzazione di materiali catodici. In particolare la ricerca ed i temi sviluppati dal Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician" sono stati orientati in due direzioni: una rivolta agli ossidi misti di metalli di transizione (Ni, Mn) operanti ad una tensione di 4,8 vs. V Li che richiede additivi agli elettroliti convenzionali che possono operare fino a 4,5 V, l'altra rivolta ai fosfati di manganese di tipo olivinico, più stabili degli ossidi, operanti ad un voltaggio di 4,1 V vs. Li con una capacità specifica nominale superiore a quella degli ossidi, Inoltre è stato garantito il supporto all'ENEA per la fornitura di campioni per realizzare celle da laboratorio.

Inizialmente è stata eseguita la sintesi di $LiMnPO_4$ nanometrico ricoperto di carbone (anche in presenza di composti del vanadio) mediante tecniche sol-gel a partire da precursori solubili di elevata purezza. È stata poi effettuata la caratterizzazione strutturale e morfologica per valutare la qualità del materiale sintetizzato, che è stato poi utilizzato per preparare elettrodi di composizione ottimizzata. Inoltre sono stati anche preparati elettrodi a base di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ commerciale od eventualmente sintetizzato, dopo caratterizzazione strutturale e morfologica delle polveri. Poiché il bilanciamento degli elettrodi è il fattore cruciale per il buon funzionamento di una batteria litio-ione, il coordinamento tra l'unità di Bologna e quella che ha preparato il materiale anodico (Università di Camerino) è stato indirizzato all'ottimizzazione della formulazione e del carico elettrodico per renderlo funzionale all'abbinamento degli elettrodi in batteria.

Inoltre l'Università di Bologna ha realizzato batterie litio-ione (circa 1 mAh/cm^2) ad elevata energia specifica, operanti in elettroliti a base di carbonati organici e sali di litio, che utilizzeranno catodi a base di $LiMnPO_4$ o di $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ e anodi realizzati da altri Partner a base di grafite o silicio, ottimizzati sia in termini di composizione che di carico. Tali celle complete sono state caratterizzate secondo un protocollo concordato con ENEA per quanto riguarda il tipo di processo di carica, galvanostatica o galvanostatica seguita da potenziostatica (CC oppure CC+CV), i potenziali di carica a tensione costante ($V_{top\text{-}off}$), eventuali OCV fra carica e scarica, potenziale di fine scarica ($V_{cut\text{-}down}$), C-rate delle prime cariche-scariche, valori di C-rate delle seguenti cariche e scariche, numero di cicli per C-rate, numero di test di impedenza e temperature dei test.

Università di Camerino, Scuola di Scienze e Tecnologie

L'Università di Camerino ha svolto le attività, che si inseriscono nei subtask a.1 e a.2 e nei subtask b.1 e b.2 del PAR 2013, riguardanti la ricerca, in prosecuzione delle attività già svolte con il PAR 2012, su batterie redox a flusso e su materiali anodici innovativi (a base di silicio e/grafene) per batterie al litio per applicazioni alle reti elettriche.

Per le attività relative a materiali anodici per batterie litio-ione di più elevata energia specifica si è puntato al miglioramento delle prestazioni di elettrodi Sn/grafene e Si/grafene mediante l'utilizzazione di binder diversi dal PVDF (es. carbossimetilcellulosa, acido poliacrilico ad elevato peso molecolare) con il vantaggio di evitare i

problemi ambientali e di costo legati all'uso di N-metilpirrolidone. È stata inoltre curata l'ottimizzazione della formulazione degli elettrodi e studiato l'effetto di additivi per la stabilizzazione dell'interfaccia. Oltre a fornire supporto nella caratterizzazione delle semicelle e celle con opportuni catodi, il materiale ottimizzato è stato preparato in quantità significative (2-4 g) per essere trasferito all'Università di Bologna ed all'ENEA per prove in celle complete. Celle da laboratorio sono state caratterizzate secondo il protocollo concordato con ENEA per quanto riguarda il tipo di processo di carica, galvanostatica o galvanostatica seguita da potenziostatica (CC oppure CC+CV), i potenziali di carica a tensione costante ($V_{top\text{-}off}$), eventuali OCV fra carica e scarica, potenziale di fine scarica ($V_{cut\text{-}down}$), C-rate delle prime cariche-scariche, valori di C-rate delle seguenti cariche e scariche, numero di cicli per C-rate, numero di test di impedenza e temperature dei test.

Per la parte riguardante le batterie redox al vanadio, l'attività ha riguardato il completamento degli studi di sviluppo della batteria redox a flusso classiche Vanadio/Vanadio e l'esplorazione di nuovi concetti di batterie a flusso che utilizzano materiali già sperimentati nelle celle al litio sotto forma di sospensioni concentrate (fino a 10-20 M) di componente attivo in carbonati organici. Il completamento degli studi sulla batteria a flusso Vanadio/Vanadio ha avuto come oggetto la definizione di un modello di gestione della cella stessa volto ad identificare uno o più parametri utili per definire i tempi e le modalità di interventi di manutenzione. Gli studi si sono avvalsi di celle fornite da ditte esterne (ERG e AEA Loccioni).

Inoltre l'attività esplorativa su nuovi concetti di batterie a flusso è stata basata sull'applicazione di materiali già sperimentati nelle celle al litio ed utilizzati in forma semiliquida in sospensioni concentrate di componente attivo in cui carboni nanometrici, presenti in concentrazioni elevate (5-10%) costituiscono un network elettronicamente conduttivo che permette il trasferimento di elettroni da bulk al collettore di corrente. Il principale vantaggio di questi tipi di celle a flusso risiede nella possibilità di aumentare le concentrazioni di materiale attivo di un fattore di 10-20 rispetto alla batteria Vanadio/Vanadio, a causa di problemi di solubilità delle varie specie le concentrazioni massime della materia attiva è dell'ordine di 1,7- 2 M.

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, nel subtask c.1, per l'identificazione del ciclo rappresentativo di potenza con cui è sollecitato un sistema di accumulo elettrochimico installato sull'alimentazione di una tranvia per effettuare risparmio energetico e la funzione "demand-response" per la rete di distribuzione in MT.

In particolare le attività svolte hanno riguardato due aspetti tra di loro collegati:

1. l'identificazione del ciclo di potenza assorbita da un sistema di accumulo istallato sull'alimentazione di una tranvia per il risparmio energetico ed il servizio svolto per la rete di distribuzione in media tensione, mediante lo svolgimento di una campagna sperimentale di raccolta dati sulla metropolitana leggera in esercizio a Bergamo,
2. il dimensionamento di massima dei sistemi di accumulo da installare per rendere massimo il vantaggio energetico ed economico.

Le attività hanno compreso lo studio e la successiva installazione di un sistema di misura per l'individuazione degli assorbimenti energetici delle sottostazioni di alimentazione delle linee di contatto e a bordo treno per individuare il ciclo di frenatura.

Collaborazione con la ditta FIB (Fabbrica italiana batterie, ex FAAM)

La FIB ha fornito a titolo gratuito un lotto di celle al litio, già usate, per lo svolgimento delle attività previste nel subtask c.2 relative all'analisi sperimentali per la "second life" di celle litio-ione. In totale la FIB ha fornito 19 celle litio-ione, di cui 15 celle da 90 Ah e tensione di circa 3,40 V, e 4 celle da 40 Ah con tensione fra 3,5 e 3,6 V.

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 "locale", può essere ottenuta in diversi modi e in particolare, con specifico riferimento alla produzione di energia elettrica in impianti di taglia media e piccola, 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) può essere immesso nella rete nazionale distribuzione del gas naturale come biometano.

Questo richiede da un lato l'ottimizzazione dei processi di conversione della biomassa in biocombustibili gassosi, per aumentare la resa e la quota di metano prodotta, dall'altro lo sviluppo di sistemi di upgrading che consentano di ottenere il gas della qualità necessaria e di minimizzare le emissioni gassose nocive per la salute e per l'ambiente, ed impianti affidabili e di facile gestione.

I processi di DA e le successive fasi di clean up e upgrading (rimozione della CO_2) del biogas sono oggetto di crescente attenzione per i vantaggi che il loro impiego potrebbe presentare. In questa direzione vanno le attività di ricerca per lo studio di sistemi di DA ottimizzati in termini di resa di biogas, presenza di inquinanti, utilizzo di nuove possibili miscele in co-digestione.

Per quanto riguarda la produzione di syngas mediante i processi di gassificazione delle biomasse lignocellulosiche, il quadro si differenzia notevolmente passando dal processo che utilizza acqua supercritica ai sistemi di gassificazione "a secco", finalizzati alla produzione di syngas ricchi in metano (bio-SNG).

La produzione di energia da biogas può essere realizzata in impianti di diversa taglia e tipologia, ma la sua economicità è spesso problematica per i costi elevati connessi alla realizzazione di tali impianti di conversione.

E' indubbio che l'industria, soprattutto quella estera, sia presente con prodotti maturi ed affidabili, tuttavia è altrettanto evidente la necessità di sostenere e sviluppare la ricerca in questo campo, in particolare in Italia, sia per quanto riguarda le tipologia e le potenzialità delle biomasse alimentabili, sia per le problematiche legate alla collocazione finale del digestato.

Tenendo conto delle particolari caratteristiche del sistema produttivo agricolo nazionale, la tipologia più richiesta di digestore anaerobico è quella di impianti di piccola-media taglia ad alta resa energetica. Un discorso analogo vale, forse in maniera anche maggiore, per i gassificatori di biomasse lignocellulosiche, che rappresentano una tecnologia ancora non sufficientemente matura, sia per i sistemi di piccola-media taglia che per quelli di maggiori dimensioni.

Le tecnologie basate sulla combustione delle biomasse presentano ancora problemi da risolvere, per cui è necessario esplorare possibili soluzioni innovative per aumentare l'efficienza complessiva del sistema caldaia-generatore e per ridurre le emissioni di particolato fine e di composti organici volatili, agendo sia sui sistemi di combustione che su nuovi dispositivi di abbattimento.

Per lo sviluppo di caldaie a sali fusi, sono stati effettuati studi sul possibile di utilizzo di questo vettore energetico in caldaie a combustibile fossile in associazione con sistemi di riscaldamento solare ad alta temperatura per impianti di produzione di energia elettrica di grande potenza mediante cicli combinati, mentre non sono note attività riguardanti l'associazione di combustori a biomassa con caldaie a sali fusi e neppure studi sui sistemi di conversione da associare a questi dispositivi, soprattutto in una fascia di potenza medio-bassa compatibile con la generazione-cogenerazione elettrica distribuita.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività proposta per il triennio 2012-2014 prevede la sperimentazione su dispositivi e impianti pilota di processi e tecnologie, studiati e sviluppati nell'ambito delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema, per la produzione e purificazione di biogas e syngas, e il trattamento dei fumi di combustione delle biomasse lignocellulosiche, in modo da ottenere una serie di "prodotti" di un reale interesse applicativo.

L'ottimizzazione dei sistemi di produzione di biocombustibili gassosi viene perseguita mediante lo studio e lo sviluppo di processi che consentono di ampliare la tipologia di biomasse utilizzabili. In particolare, proseguiranno le attività relative a:

1. produzione di biogas da biomasse ad elevato contenuto in cellulosa e lignina con la sperimentazione in laboratorio dell'idrolisi con funghi anaerobici ruminali e batteri isolati precedentemente;
2. produzione di microalghe aumentando la capacità dei sistemi di coltura basati sull'uso di nutrienti presenti nel digestato liquido prodotto dall'impianto di digestione anaerobica, con conseguenti test di producibilità di biogas;
3. sperimentazione in impianto pilota di processi di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di particolari tipologie di biomasse ad elevato tenore di umidità (fanghi di depurazione, biomassa algale ecc.).

Il tema della produzione di biometano di qualità adatta all'immissione in rete viene affrontato approfondendo lo studio e lo sviluppo dei processi di rimozione della CO_2 (fuel upgrading), sia dal punto di vista quantitativo che riguardo alla selettività, e di eliminazione dei contaminanti presenti nel biogas o nel syngas. In particolare, proseguiranno da un lato gli studi e le sperimentazioni avviati nel corso degli anni precedenti sui processi che hanno prodotto risultati incoraggianti, dall'altro si affronteranno le problematiche aperte per la separazione della CO_2, con l'obiettivo di realizzare sistemi efficienti ed efficaci, anche per quantità di gas da trattare relativamente basse. Continueranno, quindi, gli studi sui sistemi di separazione selettiva della CO_2 basati sull'utilizzo di ammine in soluzione organica con rigenerazione a bassa temperatura e sui processi di rimozione della CO_2 tramite formazione di idrati.

Le attività relative alla digestione anaerobica e quelle sulla purificazione del biogas è oggetto di un progressivo scale-up fino alla realizzazione di prove sperimentali con dispositivi inseriti a valle dell'impianto pilota di produzione di biogas DMM6000. Analogamente, il processo di produzione di gas naturale di sintesi (BIOSNG) ottenuto dalla gassificazione di biomasse lignocellulosiche (syngas) viene implementato utilizzando un impianto pilota di piccola taglia, in grado di operare sia in condizioni isoterme che adiabatiche, in modo da studiare la fluidodinamica del processo di metanazione in condizioni simili a quelle di un impianto industriale.

Sono proseguite infine le attività avviate nel corso della precedente annualità finalizzate alla ricerca e sviluppo di sistemi cogenerativi innovativi di piccola-media taglia a maggior efficienza energetica (caldaie a sali fusi ad alta temperatura associate a cicli termici operanti sia con vapore d'acqua che con fluidi innovativi) basati sulla combustione di biomasse lignocellulosiche, e di nuovi dispositivi catalitici per la riduzione del particolato fine e degli inquinanti organici presenti nei fumi.

Le attività della presente annualità si articolano in quattro obiettivi, corrispondenti a tre diverse linee di ricerca , ed una linea specifica per le attività di comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali, come riportato di seguito:

a. Sviluppo dei sistemi di produzione di biocombustibili
b. Sviluppo di sistemi di upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale
c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi
d. Comunicazione e diffusione dei risultati

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Sviluppo dei processi di produzione dei biocombustibili

Le attività svolte hanno riguardato in particolare:

- i processi di digestione anaerobica alimentati con mix di biomasse a maggior contenuto lignocellulosico e/o colture algali, anche per incrementarne la produzione in idrogeno e metano;
- i processi di produzione di microalghe, con il trattamento ed il condizionamento della frazione liquida del digestato;

- le prestazioni e l'affidabilità dei processi di gassificazione di biomasse ad elevato tenore di umidità per la produzione di syngas da impiegare in sistemi cogenerativi ad alta efficienza e limitato impatto ambientale.

a.1 Processi innovativi per la produzione di biogas a più elevato contenuto in metano e/o miscele di metano e idrogeno

Le attività di ricerca oggetto di questo subtask sono finalizzate allo sviluppo e alla sperimentazione di una nuova tecnologia, idonea a trattare efficacemente scarti ed effluenti organici di diversa natura con la produzione di biogas a più elevato contenuto di metano e/o miscele di metano e idrogeno, in linea con le strategie europee sul trattamento delle biomasse di scarto (Waste 7 - Call Climate) e della proposta di Direttiva Europea (ottobre 2012) che promuove la produzione di biocombustibili e biocarburanti a partire da scarti e sottoprodotti agroalimentari piuttosto che da produzioni agricole dedicate.

In quest'ottica, particolare attenzione è stata prestata non solo alla tecnologia di processo vera e propria, ma anche alla possibilità di utilizzare come materie prime per la digestione anaerobica biomasse a maggior contenuto di materiale lignocellulosico e/o colture algali.

La tecnologia oggetto della ricerca si basa su un processo di DA a doppio stadio, che prevede l'impiego di un impianto pilota di scala laboratorio, realizzato e messo a punto nel corso delle precedenti annualità della RdS, costituito da un reattore biologico separato, denominato di seguito primo stadio, in cui avviene la degradazione (idrolisi ed acidogenesi) dei materiali organici di qualsiasi provenienza, e di un secondo reattore di metanogenesi per la produzione di biogas [rapporto RdS 2014/254].

Le attività relative all'ottimizzazione del processo di DA a doppio stadio sono state effettuate alimentando l'impianto pilota esclusivamente con scotta, che è un effluente di scarto delle industrie casearie.

Il piano sperimentale, in questo anno di attività, è stato impostato con la finalità di ridurre i tempi di ritenzione idraulica del II stadio (HRT = 7,5 giorni), rispetto alla passata sperimentazione (HRT = circa 15 giorni) tramite l'utilizzo di un ricircolo in discontinuo del digestato stesso, con una portata uguale a quella del substrato in ingresso. La possibilità di ridurre i tempi di ritenzione e dimezzare il carico organico entrante assolverebbe al duplice obiettivo di diminuire il volume del reattore (II stadio) a parità di energie prodotta, con un conseguente abbassamento dei costi per le piccole aziende del settore lattiero-caseario, e di poter operare a più bassi carichi organici senza un'eccessiva diluizione del substrato tale e quale. Inoltre è bene ricordare che nel ciclo operativo dei caseifici vengono prodotte acque di scarico di lavaggio degli ambienti e delle apparecchiature (fino a 5 L di acqua per litro di latte trattato), contenenti un carico organico molto più basso, ma che devono essere comunque convogliate in impianti di trattamento.

L'intera sperimentazione ha previsto la messa in opera di cinque distinte serie di prove:

Serie 1 - Reattore CSTR (Completely Stirred Tank Reactor) Monostadio alimentato con scotta ad una concentrazione di 5 g/L di TVS Sol, corrispondente ad un OLR (organic loading rate) di 0,67 $g_{substrato}/L_{reattore}$·giorno. La scotta con un carico organico di 10 g/L di solidi volatili (VS) al momento dell'ingresso nel reattore era miscelato in un rapporto 1:2 con il digestato proveniente dal reattore. Ai fini del calcolo del carico organico il valore di tale digestato reimmesso viene considerato nullo. Questa condizione sperimentale prende il nome di M1. ·

- Serie 2 - Reattore CSTR Monostadio alimentato con scotta ad una concentrazione di 10 g/L di VS, corrispondente ad un OLR di 1,33 $g_{substrato}/L_{reattore}$·giorno. Anche in questa condizione vi era una diluizione della scotta entrante (20 g/L di VS) col digestato come nella serie precedente. Questa condizione sperimentale prende il nome di M2.
- Serie 3 - Reattore CSTR Bistadio in cui il I stadio veniva alimentato con una concentrazione di scotta di 10 g/L di VS, corrispondente ad un OLR di 0,67 $g_{substrato}/L_{reattore}$·giorno. In questa serie sperimentale il ricircolo è stato spostato sul primo stadio con l'intento di mantenere il pH stabile evitando l'aggiunta di sistemi tampone. Per mantenere invariato sia il carico organico rispetto al monostadio M1 (5 g/L di VS) che l'HRT del II stadio, l'HRT del primo stadio era impostato a 12 h. Questa condizione sperimentale prende il nome di B1.
- Serie 4 - Reattore CSTR Bistadio in cui il primo stadio veniva alimentato con scotta ad una concentrazione di 10 g/L di VS, corrispondente ad un OLR di 0,67 $g_{substrato}/L_{reattore}$·giorno. Differentemente dalla serie sperimentale precedente, qui il ricircolo veniva effettuato al II stadio, come descritto nella sperimentazione in monostadio, diluendo l'effluente del primo, pertanto il secondo stadio veniva comunque alimentato con un carico di 5 g/L di VS. L'HRT del primo stadio veniva impostata a 24 h. In questo caso per mantenere stabile il pH ed evitare l'acidificazione dovuta all'aumento dei VFA nel I stadio, la scotta veniva diluita con tampone fosfato 0,2 M. Questa condizione sperimentale prende il nome di B2.
- Serie 5 - Reattore CSTR Bistadio in cui il primo stadio veniva alimentato con scotta ad una concentrazione di

20 g/L di VS, corrispondente ad un OLR di 1,33 $g_{substrato}/L_{reattore}$·giorno. Con il raddoppio del carico organico utilizzato è stato necessario duplicare il potere tamponante del tampone fosfato utilizzato (0,4 M). Nel II stadio veniva mantenuto il ricircolo come nella serie sperimentale precedente, il carico organico entrante risultava essere di 10 g/L di VS. Questa condizione sperimentale prende il nome di B3.

Nelle Tabelle 24 e 25 sono riportati i parametri di performance (velocità del processo o GPR, produzione specifica di metano o SGP) del processo di produzione di metano in monostadio e bistadio nelle diverse serie sperimentali e quelle del processo di produzione di idrogeno nelle configurazioni sperimentali B2 e B3.

Tabella 24. Dati relativi alla produzione di metano delle diverse serie sperimentali

	M1	M2	B1	B2	B3
Flusso Biogas (NL/g.)	17,1 ± 0,96	31,2 ± 1,2	18,3 ± 0,93	19,8 ± 0,60	25,07 ± 0,14
CH_4 (%)	56,3 ± 0,65	51,2 ± 0,77	66,8 ± 2,75	58,7 ± 1,2	56,7 ± 0,37
Flusso CH_4 (NL/g.)	9,59 ± 0,54	15,0 ± 0,61	12,2 ± 0,64	11,6 ± 0,44	14,7 ± 0,15
GPR ($NL_{CH4}·L_{reattore}^{-1}·g.^{-1}$)	0,19 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,29 ± 0,01
SGP($NL_{CH4}·g_{VS}^{-1}$)	0,28 ± 0,016	0,23 ± 0,01	0,36 ± 0,02	0,34 ± 0,13	0,22 ± 0,01

Tabella 25. Dati relativi alla produzione di idrogeno nella configurazione B2 e B3

	B2	B3
Flusso Biogas (NL/g.)		
H_2 (%)	39,0 ± 2	34,4 ± 0,5
Flusso H_2(NL/g.)	3,91 ± 0,50	4,19 ± 0,09
GPR ($NL_{H2}·L_{reattore}^{-1}·g.^{-1}$)	1,15 ± 0,15	1,23 ± 0,03
SGP($Nml_{H2}·g_{VS}^{-1}$)	115 ± 0,02	62,0 ± 0,01

Confronto tra i processi di produzione di metano in monostadio

Il grafico in Figura 67 mostra come la produzione di metano nella configurazione M2 sia circa 1,6 volte superiore a M1, il GPR passando da 0,19 $NL_{CH4}·L_{reatt}^{-1}g.^{-1}$ a 0,31 NL_{CH4} $L_{reatt}^{-1}.g.^{-1}$. Tuttavia alla più elevata efficienza in termini di produzione volumetrica di metano, corrisponde una maggiore efficienza nella sua produzione specifica. La produzione specifica di metano è, infatti, leggermente inferiore, passando da 0,28 NL_{CH4}/g_{VS} per M1 a 0,23 NL_{CH4}/g_{VS} per M2, ossia a parità di carico organico la configurazione M1 produce più metano.

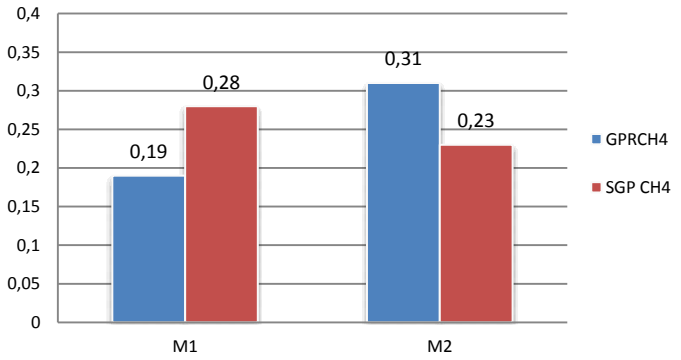


Figura 67. Configurazioni M1 e M2: confronto dei valori di GPR ($NL_{CH4}·L_{reattore}^{-1}·g^{-1}$) e SGP ($NL_{CH4}·g_{VS}^{-1}$)

I dati di GPS sono confermati da quelli di rimozione del COD. In M1 viene riscontrata una percentuale di rimozione del COD del 79,7% contro quella del 71,3% in M2. Di conseguenza, si può ipotizzare che a concentrazioni di carico organico di 10 g/L di VS, l'HRT di 7,5 giorni non è sufficiente, e probabilmente un tempo più lungo avrebbe migliorato la capacità di rimozione del substrato aumentando, quindi, anche la produzione specifica di metano.

Confronto tra i processi di produzione di metano in bistadio

E' interessante a questo punto vedere le differenze riscontrate tra le condizioni B1 e B2-B3, dove nel I stadio si sono instaurate due vie metaboliche differenti, rispettivamente di consumo e di produzione di idrogeno [rapporto RdS/PAR2013/254]. Nella Figura 68 sono riportati i parametri di processo delle tre serie sperimentali (B1, B2, B3) in bistadio.

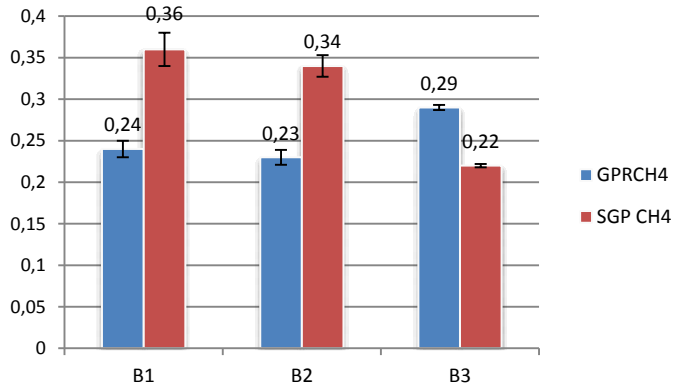


Figura 68. Configurazioni B1, B2 e B3: confronto dei valori di GPR ($NL_{CH4}{\cdot}L_{reattore}^{-1}{\cdot}g.^{-1}$) e SGP ($NL_{CH4}{\cdot}g_{VS}^{-1}$)

Come si può osservare, ai fini dell'efficienza energetica relativa alla produzione di metano, la via metabolica attiva nel I stadio ha un effetto trascurabile in quanto le differenze di GPR e di SGP nella configurazione B1 e B2, come anche quelle relative alle percentuali di rimozione di COD, non sono statisticamente significative con un intervallo di confidenza del 95% .

Per le configurazione B2 e B3 i risultati ottenuti sono simili a quanto riscontrato per i reattori in monostadio, ovvero, quella alimentata con una quantità di solidi volatili più elevata (10 g/L), B3, mostra da un lato una maggiore produzione di metano, GPR_{B3} = 0,28 ± 0,002 $NL_{CH4}\ L_{reatt}^{-1}{\cdot}g.^{-1}$, contro GPR_{B2} = 0.23 ± 0,01 $NL_{CH4}\ L_{reatt}^{-1}\ g.^{-1}$, ma dall'altro ha una minore efficienza, sia come produzione in rapporto ai VS entranti, SGP_{B3} = 0,21 ± 0,01 NL_{CH4}/g_{VS}, contro SGP_{B2} = 0,34 ± 0,01 NL_{CH4}/g_{VS}, che come rimozione del carico organico: COD = 74,03% ± 3,1 in B3 contro 86,3 ± 0,62 in B2.

Anche in questa serie sperimentale, l'aumento del carico organico determina una più bassa produzione specifica di metano e pertanto anche in una configurazione bistadio l'HRT di 7,5 giorni appare limitante.

Confronto monostadio e bistadio per la produzione di metano (5 g/L di VS)

Le configurazioni M1, B1 e B2 sono state alimentate alla stessa concentrazione di VS (5 g/L). Il confronto è stato effettuato tra il bistadio B2 ed il monostadio M1, in quanto i dati di produzione di metano in entrambe le configurazioni B1 e B2 erano confrontabili.

Come si può osservare dalla Figura 69, la configurazione in bistadio risulta avere sempre una performance più elevata rispetto all'impianto in monostadio, sia in termini di GPR (GPR_{M1} = 0,19 ± 0,01 $NL_{CH4}\ L_{reatt}^{-1}{\cdot}g^{-1}$; GPR_{B2} = 0,23 ± 0,01 $NL_{CH4}{\cdot}L_{reatt}^{-1}{\cdot}g.^{-1}$) che di SGP ($SGP_{M1}$ = 0,28 ± 0,02 NL_{CH4}/g_{VS}; SGP_{B2} = 0,34 ± 0,013 NL_{CH4}/g_{VS}). In B2 il processo di digestione anaerobica in bistadio ha una più elevata efficienza nel degradare la sostanza organica, con una rimozione del COD del 86,30 % ± 0,62 rispetto al monostadio (79,7 % ± 2,63).

Nei digestori anaerobici, soprattutto in mesofilia, si stima che circa il 70% del metano prodotto durante il processo di DA derivi dalla trasformazione dell'acetato per opera dei metanigeni acetoclasti, appartenenti alla famiglia delle *Methanosarcinales*. Tuttavia si conoscono solo due generi che utilizzano l'acetato come substrato per la metanogenesi: i *Methanosarcina*, molto versatili, che sono in grado di utilizzare più tipi di substrato e all'acetato preferiscono i composti metilati e le metilammine e possono inoltre passare dal metabolismo acetotrofo a quello idrogenotrofo utilizzando H_2/CO_2, e i *Methanoseata*, che sono invece acetotrofi obbligati e pertanto sono considerati degli specialisti più efficaci rispetto ai *Methanosarcina*. Smith& Ingram-Smith riportano che la soglia minima di concentrazione dell'acetato richiesta per la crescita dei *Methanosarcina* è di circa 1 mM, mentre per i *Methanosaeta* si stima un range di 5-20 μM.

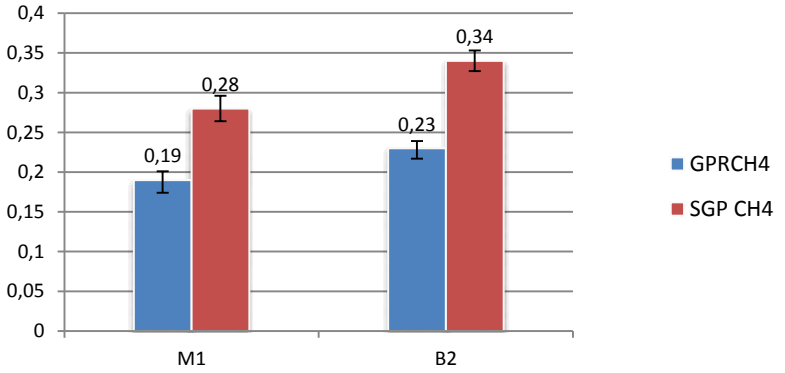


Figura 69. Configurazioni M1 e B2: confronto dei valori di GPR ($NL_{CH4}·L_{reattore}^{-1}·g.^{-1}$) e SGP ($NL_{CH4}·g_{VS}^{-1}$)

Nel corso della presente annualità è stata effettuata l'analisi della comunità batterica mediante tecnica non colturale FISH (Fluorescence In Situ Hybridization), per lo stadio produttore di metano. All'interno degli Archea sono stati indagati i generi *Methanosarcina* e *Methanosaeta*, sia in termini di composizione percentuale che come numero di cellule batteriche totali. Ulteriori determinazioni sono state effettuate per il dominio degli Eubatteri, con i quali i metanigeni stabiliscono una relazione di tipo sintrofico. Lo scopo del lavoro è stato quello di indagare se e quali cambiamenti di comunità erano intervenuti nelle diverse configurazioni del processo di produzione del metano, sia in rapporto ai due domini Eubacteria e Archea, sia relativamente ai due generi di metanigeni.

Nella configurazione monostadio M1, quella cioè con la minore produzione di metano, (GPR = 0,19 L_{CH4}/L_{reatt}*g.), si osserva la minore quantità di Archea, sia come numero di cellule per mL che come percentuale rispetto alle cellule rilevate, con valori del 13,6% contro il 16,8% nel bistadio. Inoltre nel monostadio si rileva una più elevata percentuale di Eubatteri, con valori del 69,8% contro 60,4%. Di conseguenza anche la percentuale relativa di Archea nella comunità del reattore bifase è più elevata.

E' opinione comune che la separazione del processo di digestione anaerobica in due stadi corrisponda ad una separazione fisica delle comunità che attuano il processo di idrolisi/acidogenesi nel primo stadio e quello di acetogenesi/metanogenesi nel secondo stadio. Nella realtà del processo questo non è mai del tutto vero, in quanto i substrati non fermentati nel primo stadio attivano la comunità degli acidogeni nel secondo. Quindi nel secondo stadio tutti e quattro gli step funzionali in cui è separata la digestione anaerobica (idrolisi, acidogenesi, acetogenesi e metanogenesi), sono attivi. Nel caso del monostadio M1 è, quindi, possibile ipotizzare che la più elevata presenza in percentuale degli Eubatteri sia da attribuirsi alla comunità degli idrolitici e acidogeni.

Confronto monostadio e bistadio per la produzione di metano (10 g/L di VS)

Le configurazioni M2 e B3 sono state alimentate alla stessa concentrazione di VS (10 g/L). Come si può osservare dalla Figura 70, i valori di GPR e di GPS e di rimozione del carico organico di entrambe le configurazioni sono confrontabili, con valori di GPR e SGP di poco superiori in M2. Nel monostadio il GPR_{M1} e il SGP_M risultano pari a 0,19 ± 0,01 $NL_{CH4}/L_{reatt}^{-1}·g.^{-1}$ e a 0,28 ± 0,02 NL_{CH4}/g_{VS}, rispettivamente. Nel bistadio il GPR_{B2} è di 0,23 ± 0,01 $NL_{CH4}·L_{reatt}^{-1}·g.^{-1}$), con una resa in SGP pari 0,34 ± 0,013 NL_{CH4}/g_{VS}. In B2, tuttavia, il processo di digestione anaerobica ha una più elevata efficienza nel degradare la sostanza organica, con una rimozione del COD del 74,03% ± 4,10 rispetto al monostadio (71,3% ± 2,04).

Sebbene ci si sarebbe aspettata una produzione di metano più elevata nel bistadio, come riscontrato nella serie sperimentale a carico organico inferiore (5g/L VS), è possibile ipotizzare che le variazioni del volume di fermentazione del I stadio, con la diluizione della scotta in caso di svuotamento e il funzionamento in batch del II stadio con il blocco della pompa di trasferimento del substrato dal primo reattore al secondo, sono stati determinati valori di OLR e di HRT , nel II stadio, rispettivamente inferiori e più elevati di quelli impostati.

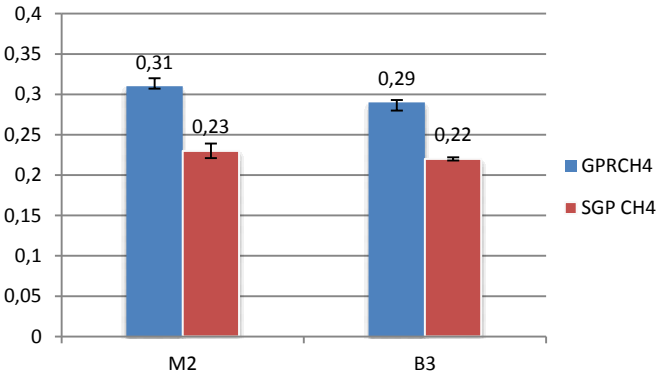


Figura 70. Configurazioni M1 e B3: confronto dei valori di GPR ($NL_{CH4}\cdot L_{reattore}^{-1}\cdot g.^{-1}$) e SGP ($NL_{CH4}\cdot g_{VS}^{-1}$)

Confronto dell'efficienza energetica dei processi monostadio e bistadio

Nella Tabella 26 vengono riportati i dati riassuntivi dei due parametri utilizzati per calcolare la resa energetica del processo di digestione anaerobica nelle configurazioni monostadio e bistadio. Sia per il metano che per l'idrogeno le conversioni energetiche sono state effettuate sui rispettivi poteri calorifici inferiori: 31,65 kJ/L per il CH_4 e 11,11 kJ/L per l'idrogeno.

Nella successiva Tabella 27 si riporta invece il quantitativo di energia generabile sotto forma di biogas della scotta utilizzata nelle diverse configurazioni, stimato in base ai valori del parametro SGP ($NL^*g_{VS}^{-1}$).

Per la sperimentazione a 5 g/L VS, con entrambe le configurazioni bistadio (B1 e B2), si ottiene un incremento dell'efficienza energetica del processo di digestione anaerobica rispettivamente del 28 e del 35%. L'utilizzo della scotta ad un contenuto energetico superiore (10g/L VS) determina un aumento dell'efficienza energetica del processo in bistadio (B3) di solo il 5% rispetto al monostadio M2.

Tabella 26. Prestazioni relative della produzione di idrogeno e di metano in tutte le configurazioni

	M1 (5 g/L VS)	M2 (10 g/LVS)	B1 (5g/lLVS)	B2 (5g/L VS)	B3 (10 g/L VS)
$GPR(NL_{H2}\cdot L_{reattore}^{-1}\cdot g.^{-1})$	-	-	-	1,15 ± 0,12	1,23 ± 0,03
$SGP(NmL_{H2}\cdot g_{VS}^{-1})$	-	-	-	115 ± 0,02	62,0 ± 0,01
$GPR(NL_{CH4}\cdot L_{reattore}^{-1}\cdot g.^{1})$	0,19 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,29 ±0,01
$SGP(NL_{CH4}\cdot g_{VS}^{-1})$	0,28 ± 0,016	0,23 ± 0,01	0,36 ± 0,02	0,34 ± ,13	0,22 ± 0,01

Tabella 27. Contenuto energetico generabile della scotta nelle diverse serie sperimentali

	M1	M2	B1	B2	B3
kJ/g VS (da H_2)	-	-	-	1,28	0,69
kJ/g VS (da CH_4)	8,86	7,28	11,4	10,8	6,96
kJ/g VS totali	8,86	7,28	11,4	12,0	7,70

Trattamento biologico di biomasse lignocellulosiche e chitinose per la produzione di idrogeno e/o metano

La maggior parte delle aziende agricole in cui sono presenti impianti a biogas utilizza biomasse di scarto la cui struttura, composta da lunghe fibre di cellulosa ed emicellulosa ricoperte da lignina, rende complessa e difficile la loro degradazione ad opera dei microrganismi responsabili del processo di digestione anaerobica, al punto che il 40-60% del carbonio organico contenuto nella fitomassa introdotta nel digestore rimane inutilizzato.

All'interno della DA proprio lo stadio iniziale di idrolisi, e in particolare la degradazione del materiale lignocellulosico, rappresenta un "collo di bottiglia" dell'intero processo di produzione di bioenergia. I funghi anaerobi, scoperti per la prima volta da Colin Orpin nel 1975 nel rumine degli animali, rappresentano un promettente e nuovo settore di ricerca, poiché grazie ai loro enzimi idrolitici (cellulasi, emicellulasi, proteasi, amilasi, amiloglicosidasi, pectinasi etc.) sono considerati gli organismi con le più elevate capacità di idrolisi della cellulosa.

I funghi anaerobi sono presenti all'interno del rumine di molti erbivori, e non solo, dove costituiscono circa l'8-10% della biomassa microbica e insieme a batteri e protozoi compongono la comunità dell'ecosistema del rumine. Diversi studi hanno sottolineato l'importanza della cooperazione o sintrofia tra questi microrganismi, sviluppando proprio il concetto di alimentazione incrociata dei nutrienti tra e nelle micro nicchie ecologiche del rumine.

Lo scopo della ricerca svolta nell'ambito del PAR 2013 della RdS, condotta presso i laboratori dell'Università della Tuscia in stretta collaborazione con l'ENEA, era quello di verificare le capacità idrolitiche dei funghi anaerobi del rumine ed in particolare di *Neocallimastix* sp. ed *Orpinomyces* sp., su paglia di grano in esperimenti in batch, al fine di potenziare la fase idrolitica della DA ed incrementare le produzioni di idrogeno e metano [rapporto RdS/PAR2013/252]. Gli esperimenti hanno seguito il processo di digestione anaerobica suddivisa in due stadi:

- I fase - idrolisi e dark fermentation con produzione di H_2
- II fase - digestione anaerobica completa con produzione di CH_4.

Nella I fase sono stati inoculati ceppi di funghi idrolitici del rumine e batteri idrogeno-produttori (F210), selezionati nel corso della precedente annualità della RdS, mentre nella II fase è stato inoculato il digestato della scotta selezionatosi da un impianto in continuo (CSTR) per la produzione di metano. Tutti i test condotti sono stati effettuati a 39 °C in agitazione, utilizzando paglia di grano (8 g/L VS) come substrato da idrolizzare, in batch da 120 mL con volume di 50 mL. E' stato utilizzato come medium dell'esperimento tampone fosfato 0,1 M a pH 6,61 per mantenere costante il range ottimale di pH per gli idrogeno produttori.

Risultati della I fase

Per tutta la durata dell'esperimento il pH del mezzo di coltura si è mantenuto costante con valori compresi tra 6,5-7; il pH finale era per tutti i batch 6,5. Non sono state rilevate tracce di metano durante questa fase dell'esperimento a dimostrazione della purezza degli inoculi rispetto alla componente metanigena.

In Figura 71 è rappresentata la resa di H_2 nel tempo con diversi inoculi. I risultati hanno mostrato che negli esperimenti, dove i ceppi fungini sono stati utilizzati singolarmente è stato prodotto idrogeno, seppur in concentrazioni limitate, sia a dimostrazione della capacità idrolitica di questi due funghi, sia a conferma del fatto che i funghi in questione contengono gli idrogenosomi, organelli, deputati alla conversione degli zuccheri in idrogeno.

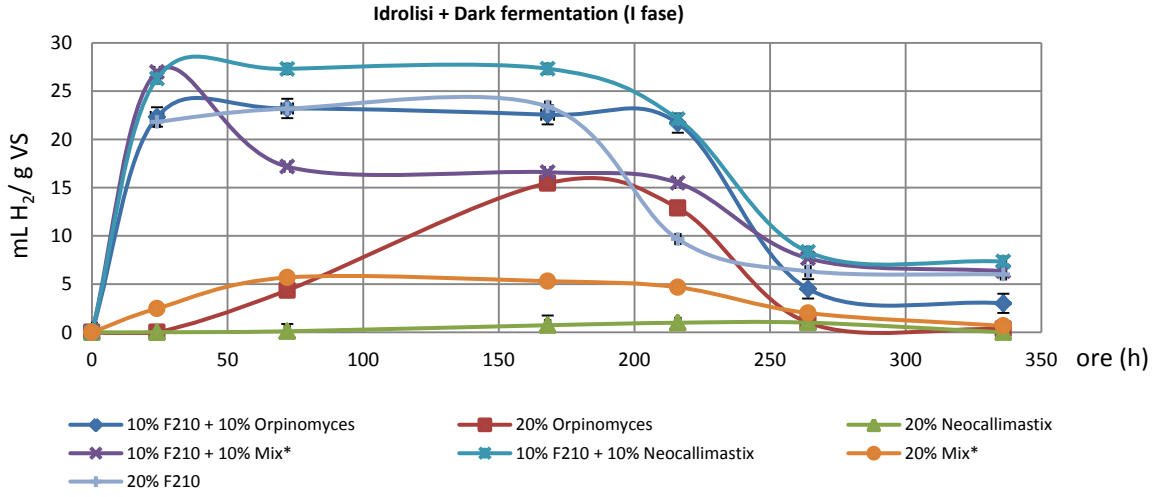


Figura 71. Produzione di H_2 nel tempo con diversi inoculi

Le produzioni più elevate di idrogeno nei batch inoculati con ceppi singoli si ottengono con *Orpinomyces* sp. alle 168 h (107,4 ± 7,4 mL/L) rispetto a *Neocallimastix* sp., sempre alle 168 h (7,9 ± 2,2 mL/L). Le produzioni di idrogeno più elevate in assoluto si ottengono invece combinando insieme F210 e *Neocallimastix* sp. (186,8 ± 12,2 mL/L).

Tra gli idrogeno-produttori F210 e i singoli ceppi fungini, in particolare *Neocallimastix* sp, si può supporre che si instauri una cooperazione, forse una sintrofia, come dimostrato dall'incremento di produzione di idrogeno del 15% rispetto al solo inoculo di batteri F210.

Risultati della II fase

La seconda fase, iniziata il 2 luglio dopo aver inoculato il digestato dell'impianto CSTR, è terminata l'8 settembre. Il

pH iniziale era 6,5-7 e si è mantenuto tale fino al 77° ed ultimo giorno dell'esperimento. I risultati, al 77° giorno, mostrati nella Figura 72 evidenziano almeno 3 raggruppamenti sulla base delle produzioni cumulative mL/L ottenute fino ad ora: i batch inoculati con i funghi anaerobi e F210 (1.357,0 ± 140,8 mL/L con *Orpinomyces*, 1.279,6 ± 47,9 mL/L con *Neocallimastix*, 1.397,2 ± 73,2 mL/L con il mix dei funghi), i batch inoculati solo con F210 (988,3 ± 148,2 mL/L e i batch inoculati solo con i funghi (435,1 ±1 94,2 mL/L con *Orpinomyces*, 236,3 ± 27,9 mL/L con *Neocallimastix* e 250,8 ± 14,6 mL/L con il mix).

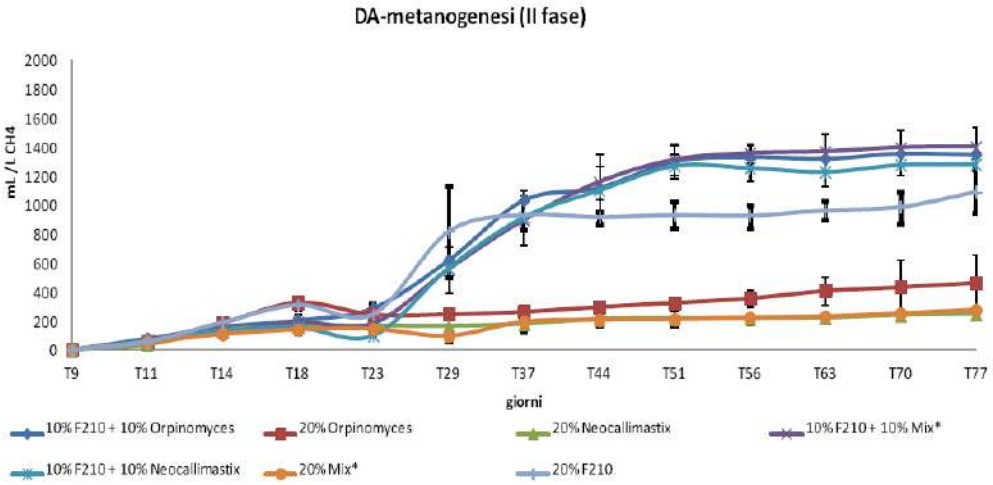


Figura 72. Produzione di CH_4 nel tempo con diversi inoculi, sono riportate le barre delle deviazioni standard. Il T9 corrisponde al T0 della metanogenesi

Il ceppo *Orpinomyces* a questo punto dell'esperimento sembra essere più produttivo di *Neocallimastix*. I risultati evidenziano e confermano anche che il pool batterico F210, oltre ad essere una comunità di idrogeno produttori, ha capacità idrolitiche ed è in grado di degradare e fermentare substrati recalcitranti quali la paglia di grano essiccata, costituita principalmente da materiali lignocellulosici.

Inoltre, i risultati migliori in termini di produzione (mL/L CH_4) si ottengono, in tutti i casi, là dove sono presenti sia F210 che ceppi fungini, per cui si può supporre, come già evidenziato nella prima fase dell'esperimento, che si instauri una cooperazione trofica tra i ceppi fungini e il pool microbico F210, determinando attraverso un effetto sinergico incrementi nella produzione di metano. Tali incrementi sono del 29% nei batch inoculati a F210 e mix fungina rispetto ai batch inoculati solo ad F210 e del 68% rispetto ai batch inoculati solo con *Orpinomyces*.

Anche in termini di resa (mL CH_4/g VS) i risultati migliori sono stati ottenuti per le condizioni in cui sono presenti sia F210 che ceppi fungini (199,6 ± 20,7 con *Orpinomyces* sp., 188,2 ± 7,0 con *Neocallimastix* sp., 205,5 ±1 0,8 con il mix dei funghi) rispetto ai batch inoculati solo con F210 (145,3 ± 21,8) o solo con i ceppi fungini (64,0 ± 28,6 con *Orpinomyces*, 34,7 ± 4,1 con *Neocallimastix* e 36,9 ± 2,2 con il mix).

Verifica dell'attività chitinolitica dell'inoculo F210

Dopo la cellulosa, la chitina è il più abbondante biopolimero presente in natura. Infatti, è uno dei principali componenti dell'esoscheletro degli insetti e di altri artropodi, della parete cellulare dei funghi, ed è presente anche nella cuticola epidermica o in altre strutture superficiali di molti altri invertebrati. Ogni anno vengono prodotti al mondo circa 3 mld di scarti contenenti elevate quantità di chitina provenienti dalla lavorazione dei crostacei. Un'altra fonte importante di materiale ad alto contenuto in chitina è il micelio esausto delle industrie produttrici di metaboliti fungini quali antibiotici, enzimi, acidi organici, ecc.

Scopo dell'attività era la verifica delle capacità chitinolitiche dell'inoculo F210, ipotizzate nella ricerca effettuata nella precedente annualità della RdS utilizzando chitina purificata. A tal fine si è utilizzato un materiale chitinoso molto simile a quello ottenibile da scarti realmente prodotti, ad esempio dalla lavorazione industriale di crostacei, con l'idea di trasformarlo in risorsa/substrato da cui ottenere energia sotto forma di bioidrogeno e/o biometano.

E' stato allestito un esperimento avvalendosi di un modello disegnato tramite metodologia RSM (Response Surface Methodology) e successiva validazione statistica dello stesso. Nel modello utilizzato le variabili studiate erano:

- concentrazione di chitina (ottenuta da carapaci di gamberetti prelevati da industria del settore, lavati ed

essiccati), utilizzata come substrato principale;

- concentrazione di corn step liquor (CSL) utilizzato in concentrazione minimale al fine di promuovere il metabolismo microbico come già riportato per vari processi industriali.

L'esperimento è stato allestito il 23 luglio dopo aver attivato per 24 h l'inoculo di batteri idrogeno-produttori F210. La quantità di inoculo aggiunta corrispondeva al 20% del volume di lavoro. Per tutta la durata dell'esperimento il pH del mezzo di coltura si è mantenuto costante con valori tra 6,5 e 6,8; il pH finale per tutti i batch è risultato pari a 6,8.

Le analisi hanno mostrato che la produzione di idrogeno raggiungeva le massime concentrazioni tra le 24 e 48 h. Le produzioni più elevate si ottengono alle massime concentrazioni di corn steep liquor e alle più basse di chitina (1:5) (242,2 ± 2,7 mL/L), mentre le più basse alle più basse concentrazioni di corn steep liquor e più alte di chitina (0:20) (123,9 ± 23,7 mL/L) [rapporto RdS/PAR2013/252]. Questo dimostra che concentrazioni elevate di chitina rappresentano un fattore limitante per il processo.

Per quanto riguarda la produzione di metano, pur essendo l'esperimento ancora in corso, è da sottolineare la notevole produzione ottenuta in alcuni test preliminari. Questa è effettivamente ragguardevole e può far ipotizzare l'utilizzo di scarti ad alto contenuto in chitina come substrato per la produzione di biogas. IL CSL può venir aggiunto o meno, ma è necessaria un'accurata analisi economica del processo per capire se l'aumentata produzione di metano ottenuta tramite ammendamento con CSL compensi una formulazione più complessa (e più costosa) del terreno di coltura.

Uso di microalghe per l'alimentazione di impianti a biogas

Le microalghe sono considerate biomasse di terza generazione per la loro elevata efficienza di fotoconversione in biomassa che, sulla base delle attuali conoscenze, potrebbe raggiungere il 5% dell'energia solare (vs 1% delle piante terrestri). Sebbene non si chiaro quale sia il processo più efficiente per la produzione di biocarburanti dalla biomassa microalgale (biodiesel, bioetanolo, biometano), recentemente l'interesse si sta focalizzando sul suo potenziale utilizzo negli impianti di digestione anaerobica per la produzione di biometano in alternativa alle biomasse provenienti da colture energetiche; inoltre l'assenza di lignina le rende substrati più facilmente fermentabili.

In studi effettuati su diverse specie microalgali, sia marine che di acqua dolce, viene sottolineata l'importanza di effettuare test specifici di digestione anaerobica sulle singole specie in quanto il valore potenziale di metano non può essere semplicemente dedotto dalla loro appartenenza filogenetica. Le microalghe, infatti, differiscono per composizione biochimica, struttura della parete cellulare, rilascio diretto ed indiretto di sostanze che possono inibire il processo di digestione anaerobica. Inoltre la composizione biochimica di differenti specie di microalghe, tramite cui è possibile stimare la produzione potenziale teorica di metano, è direttamente influenzata dalle condizioni di crescita.

Presso ENEA cinque diverse specie microalgali marine, quattro appartenenti alla classe delle *Coscinodiscophyceae* (*Cyclotella criptica, Thalassiosira rotula; Thalassiosira weissflogii; Thalossiosira weissflogii* P09) e una a quella delle *Bacillariophyceae* (*Phaeodactylum tricornutum*) sono state utilizzate come substrato nel processo di digestione anaerobica per determinare la produzione potenziale di metano [rapporto RdS/PAR2013/254]. I pellet microalgali provengono dal CNR-Istituto di Chimica Biomolecolare di Napoli.

Le specie microalgali prese in esame sono diatomee che possono, in determinate condizioni, flocculare, facilitando la sedimentazione della biomassa algale. Questa proprietà è molto importante perché, in generale, l'utilizzo delle colture microalgali richiede un concentrazione della biomassa, un passaggio molto costoso e che rappresenta uno dei limiti nei processi di produzione dei biocarburanti. Inoltre le diatomee sono costituite da frustuli di silice che permettono la sedimentazione spontanea nel giro di poche ore.

Procedura sperimentale e risultati

- Caratterizzazione chimica del substrato - E' stata effettuata l'analisi del contenuto di biomassa organica secca (TS) dei pellet microalgali mediante essiccazione a 105 °C per 24 h. E' stato poi determinato il contenuto in solidi volatili in muffola a 550 °C per 4 h;
- test di produzione di metano potenziale - Sono stati effettuati test in batch a 38 °C in fermentatori da 120 mL, nei quali a 50 mL di liquame veniva aggiunta una quantità di biomassa algale fresca corrispondente a 0,42 g TS. Il liquame, utilizzato come inoculo, proveniva da una fermentatore da un litro lasciato in batch per 30 giorni a 38 °C. I fermentatori erano chiusi con tappi di gomma butilica e sigillati con delle ghiere in alluminio deformabili. L'anaerobiosi era assicurata tramite insufflaggio di azoto. I test erano effettuati in

triplicato.

- analisi qualitativa e quantitativa del biogas - Il biogas prodotto è stato misurato e analizzato con un gas-cromatografo per determinarne la composizione.

Nella Figura 73 sono riportare le cinetiche di produzione del metano.

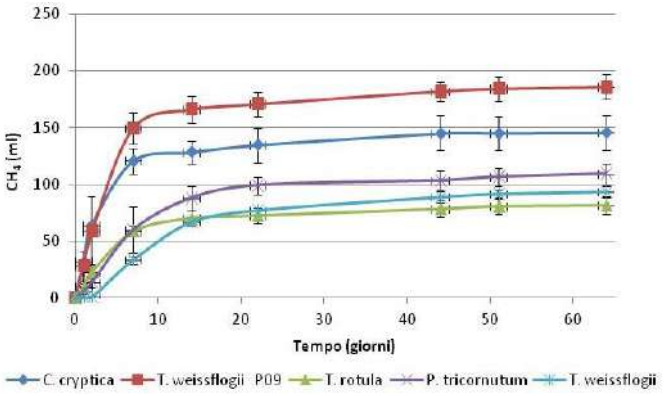


Figura 73. Cinetiche di produzione del metano

Come si può osservare per tutte le specie al 22° giorno viene raggiunto circa l'80-90 % della produzione totale. In Tabella 28 sono riportate le rese di metano (ml_{CH4}/g_{VS}) delle specie microalgali e la concentrazione (%) di metano nel biogas. La resa in metano varia da 340 a 640 mL_{CH4}/g_{VS}.

Tabella 28. Produzione specifica di metano e concentrazione (%) nel biogas

Specie algale	mL_{CH4}/g_{VS}	CH_4 (%)
Cyclotella cryptica	502 ± 53	64
Thalassiosira weissflogii P09	640 ± 38	62
Thalassiosira rotula	340 ± 33	60
Phaeodactylum tricornutum	390 ± 32	64
Thalassiosira weissflogii	491 ± 26	63

Il contenuto specifico di metano nel biogas è elevato e varia dal 60 al 64%. Come si può osservare esistono differenze rilevanti non solo tra singole specie algali, come rilevato anche da altri autori, ma anche all'interno della stessa specie. Nella Tabella 29 sono riportati i valori di sostanza secca e volatile (%) nelle specie microalgali.

Tabella 29. Contenuto in sostanza secca e volatile (%) nelle specie microalgali

Specie algale	TS (%)	VS ($\%_{w/w}$)
C. cryptica	18,1 ± 0,12	12,4 ± 0,13
T. weissflogii P09	15,5 ± 0,63	10,9 ± 0,40
T. rotula	12,5 ± 0,02	7,32 ± 0,04
P. tricornutum	21,2 ± 0,15	14,4 ± 0,18
T. weissflogii	19,1 ± 0,01	8,92 ± 0,07

Le prove effettuate dimostrano il buon potenziale di alcune microalghe come biomassa di terza generazione per la produzione di biogas, ma resta ovviamente ancora da verificarne la convenienza economica.

a.2 Sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di DA

Questa attività si pone l'obiettivo di valutare la fattibilità tecnico-economica dell'utilizzo di biomassa fitoplanctonica per alimentare un impianto di digestione anaerobica.

Il lavoro s'inquadra in una tematica, avviata nel corso delle attività della precedente annualità, che riguarda la coltivazione di microalghe in connessione a impianti di biogas, sfruttando le capacità fertilizzanti di un sottoprodotto della digestione anaerobica, denominato "digestato liquido" e utilizzando la biomassa così prodotta per ottenere nuovo biogas, mediante un'operazione di riciclo di nutrienti.



Figura 74. Fotobioreattore a sacco in stadi successivi di sviluppo

Le attività della presente annualità si sono indirizzate verso una operatività su più larga scala rispetto all'anno precedente, focalizzandosi, oltre che sui già sperimentati fotobioreattori da 30 litri in sacchi di polietilene, sulla produzione algale in vasche del volume di circa 1.500 litri, protette da una serra [rapporto RdS/PAR2013/242]. Tali vasche sono state realizzate utilizzando la struttura di economiche piscine fuori terra per bambini, opportunamente adattate con attrezzature utili allo scopo della coltivazione microalgale. Le vasche sono state poste in condizioni ambientali ottimali, con un certo grado di controllo su temperature e illuminazione, oltre che su vento e precipitazioni, ovvero in una serra con possibilità di utilizzo di aperture regolabili e teli ombreggianti.

All'interno della serra installata presso il C.R. ENEA Casaccia è stata installata una soffiante da 370 W e sono state montate 3 vasche da 3 x 2 x 0,66 m^3, oltre a diversi fotobioreattori sotto forma di sacchi di polietilene da 30 L di volume utile (Figura 74). All'interno della serra è stata anche installata una sonda per temperatura e umidità dell'aria in grado di registrare i dati ogni 15 minuti. Una sonda di temperatura con registrazione dei dati è stata inoltre inserita in una delle vasche.

Le colture sperimentali sono state movimentate tramite un sistema "air lift a piano inclinato" facente uso di aria compressa ottenuta da una soffiante e un piano inclinato a pannello, sistema realizzato "in house". L'agitazione è stata in prevalenza ottenuta tramite tale sistema, sotto al quale veniva fatta scorrere aria compressa, immessa da un tubo orizzontale con fori posto lungo il bordo inferiore del pannello; le colonne di bolle, nel loro cammino obliquo seguendo il piano inclinato, determinano un corrispondente spostamento in senso ascendente obliquo di una massa d'acqua; questa determina a sua volta una corrente circolare per tutta la vasca, grazie al pannello verticale centrale di separazione.

E' stato inoltre realizzato e testato un agitatore rotativo dotato di 8 pale con motore elettrico a 12 volt da 40 W (Figura 75), di impostazione classica per le vasche "open ponds". Anche questo sistema è stato completamente progettato e realizzato "in house".



Figura 75. Foto dell'agitatore a pale posizionato in vasca

Il ceppo utilizzato nelle colture in vasca è stato lo stesso impiegato nelle prove condotte nel 2013, ovvero lo *Scenedesmus dimorphus*. I fotobioreattori in sacco sono stati inoculati mediante colture effettuate in laboratorio con sistemi impieganti bottiglie di acqua minerale riciclate, acqua minerale e fertilizzante commerciale liquido per piante con rapporto NPK 7:5:6. In laboratorio sono state effettuate prove di sviluppo su altre specie di acqua dolce, ovvero *Botryococchus braunii*, *Arthrospira maxima*, *Arthrospira platensis*, su cui è stata successivamente applicata la procedura "SOUR" per le prove comparative di produzione di biogas.

Per fertilizzare le vasche è stato impiegato unicamente digestato liquido proveniente dall'impianto a biogas della ditta "Palombini" di Nepi. La dose standard impiegata, dell'1‰ v/v, è stata adottata come via di mezzo tra esigenze di quantitativi adeguati di fertilizzante e grado di opacità del mezzo di coltura, che tende ad inibire la penetrazione della luce soprattutto nelle fasi iniziali della coltivazione, come già riportato nella relazione dell'anno precedente.

La biomassa microalgale è stata raccolta previa decantazione naturale. Le modalità di decantazione sono consistite nell'interruzione dell'agitazione della vasca per almeno una notte (generalmente dalle 16 alle 9 della mattina successiva) e nella raccolta separata dell'acqua (acqua di risulta) soprastante il "tappetino" di alghe che si formava sul fondo e visibile in alcune fotografie. L'acqua di risulta veniva prelevata dalla vasca e immessa in vasconi cilindrici da 450 Lmediante una pompa ad immersione da 650 W per acque scure. Il "tappetino" veniva aspirato tramite un aspiratore per liquidi ed immesso in bidoni/taniche da 30 L. Il rapporto tra quanto contenuto nelle acque di risulta e quanto contenuto nel decantato rappresenta un buon indice della "separabilità" della biomassa microalgale prodotta nei diversi cicli colturali. Si è rilevata, come anche nell'annata sperimentale precedente, qualche variabilità nelle capacità di decantazione delle colture algali.

Rese produttive delle colture microalgali

Le rese produttive, in peso secco, sono state misurate mediante filtrazione di campioni ottenuti dopo decantazione di colture mature, sommando quanto contenuto nei campioni di "decantato" a quanto contenuto nelle residue "acque di risulta".

I dati di produttività di alcune colture microalgali in vasca sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 30. Prospetto dati produttivi delle vasche analizzate

ID	Data inoculo	Data raccolta	Durata, giorni	Volume iniziale, L	Volume finale, L	Fertilizzante	Resa, g/L	Resa totale, g	Resa pro die, g/L	Separabilità	Riciclo H_2O
14-1	3 giugno 2014	12 giugno 2014	9	1.500	1.300	1 ‰	0,39	505,08	0,043	73,50%	no
14-2	30 giugno 2014	4 luglio 2014	4	1.500	1.400	1 ‰	0,17	240,00	0,043	40,62%	si
14-3	4 luglio 2014	15 luglio 2014	11	1.500	1.300	1 ‰	0,29	380,17	0,027	44,50%	no
14-4	29 luglio 2014	8 agosto 2014	10	1.650	1.550	1 ‰	0,48	740,86	0,048	36,86%	no

0In figura 76 si riportano le produzioni totali di biomassa microalgale (in g e g/L) delle prove in oggetto.

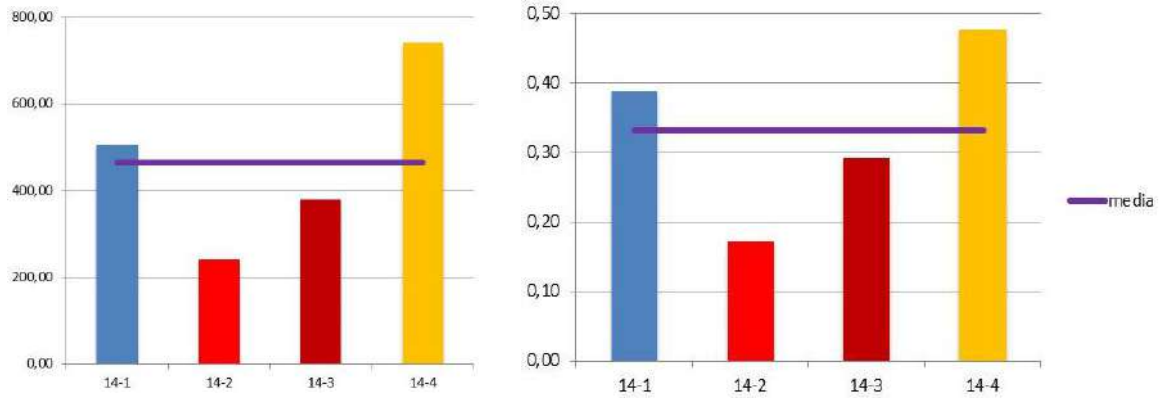


Figura 76. Resa espressa in g e g/L

Produttività in biogas

Prove comparative per una valutazione preliminare della capacità di produrre biogas di diverse specie microalgali, i cui risultati sono stati riportati nel paragrafo precedente, hanno mostrato un buon potenziale produttivo, anche se variabile da specie a specie.

La lunghezza dei tempi necessari per la realizzazione di prove di fermentazione in batch in reattori di laboratorio ha però evidenziato la necessità di mettere a punto metodologie più rapide, per consentire in futuro un confronto

immediato fra le rese di differenti colture e/o il monitoraggio della produttività di una determinata coltura nel tempo.

Sulla base di prove preliminari effettuate nell'annualità precedente, sono state quindi messe a punto nuove prove rapide di produzione potenziale di biogas tramite la procedura respirometrica dinamica denominata "SOUR" (Specific Oxygen Uptake Rate).

La procedura SOUR è stata messa a punto da Lasaridi e Stentiford (1998) per la determinazione della stabilità dei compost. Successivamente Schievano et al. (2008) hanno dimostrato l'esistenza di una correlazione altamente significativa fra la domanda specifica di ossigeno di una matrice per 20 ore, a 37 °C, in condizioni aerobiche dinamiche in cui l'unico fattore limitante è il C della matrice, e la sua produzione potenziale di biogas in condizioni anaerobiche in 60 giorni. Per la sua rapidità il test è uno strumento estremamente potente ed utile per la valutazione e l'approvvigionamento di matrici organiche da destinare alla digestione anaerobica.

A differenza del BOD5 questa tecnica consiste nel rilevare il consumo di ossigeno in condizioni non limitanti, aerando periodicamente il campione: tutto questo viene realizzato mediante un'interfaccia seriale, collegata con un computer, che realizza cicli alternati di 15 minuti di aerazione e 15 minuti di rilevamento dati (O_2 disciolto e temperatura). In ogni ciclo di misura i dati di ossigeno disciolto, espressi in mg O_2/L, avranno un andamento lineare decrescente nel tempo: la pendenza della retta rappresenta il rate di consumo di ossigeno (mg O_2 L^{-1} h^{-1}). Il grafico delle pendenze in funzione del tempo presenta una fase lag iniziale, un picco (in genere intorno alla quinta-sesta ora del test), una fase discendente: il valore del picco riferito all'unità di peso di sostanza secca contenuta nel campione rappresenta il SOUR (mg_{O2}/g_{ss}/h). L'integrale da 0 a 20 ore della curva delle pendenze permette di ricavare la domanda specifica di ossigeno OD20 (mg_{O2}/g_{ss}), che, insieme al contenuto di solidi volatili, permette di stimare la produzione potenziale di biogas, mediante la seguente equazione di correlazione (Schievano et al., 2008):

$$ABP = 13{,}782 \times VS + 26{,}161 \times OD20^{1/2} - 997{,}890$$

dove VS rappresenta il contenuto di solidi volatili del campione (% ss), OD20 è la domanda specifica di ossigeno del campione in 20 ore (mg_{O2}/g_{ss}) e ABP è il potenziale di biogassificazione anaerobica (mL biogas/g ss).

Una stima della produttività in biogas di campioni di *S. dimorphus* coltivato in fotobioreattori di polietilene e vasca, ottenuta con il metodo SOUR, è riportata in Tabella 31.

Tabella 31. Produzione di biogas da colture di *S. dimorphus*

Campione	Digestato	Fertilizzante liquido commerciale	Biogas prodotto m^3 / t s.s. (*)	Note
25 B (fotobioreattore)	2 ‰	0,5 ‰	417,28	
25 C (fotobioreattore)	10 ‰	0,5 ‰	463,89	
Vasca 1	3,4 ‰	-	347,59	Campione conservato in tanica per una settimana prima dell'analisi

(*) valori medi

Conclusioni

Il passaggio da ambienti quasi del tutto chiusi, quali quelli dei fotobioreattori in sacchi di polietilene, ad ambienti protetti, ma esposti alle contaminazioni quali quelli delle vasche aperte sperimentate nel presente lavoro, ha comportato alcune diversità nel ciclo produttivo algale:

- dopo una prima fase in cui è assolutamente prevalente lo sviluppo della specie algale inoculata, della durata tipica di circa dieci giorni - un paio di settimane, sopravviene una fase di regressione della coltura, con l'instaurarsi di forme larvali e non di insetti che si nutrono delle alghe e che trasformano la biomassa vegetale in biomassa animale.
- vi è differenza tra una coltura in vasca pulita e sterilizzata chimicamente tramite ipoclorito, inoculata da sacchi ex novo e una in cui si reimmette acqua di risulta della coltura precedente senza pulizia del fondo vasca. Il processo di riciclo dell'acqua di risulta, se addizionata di nuovo fertilizzante, ottiene tempi di sviluppo rapidi delle microalghe, ma una resistenza abbreviata alla fase di instaurazione delle larve di insetto. Occorre pertanto abbreviare il ciclo produttivo a meno di una settimana, preferibilmente a 4-6 giorni. Inoltre, vi è la possibilità che si sviluppino anche altre specie microalgali di origine naturale. Tuttavia rimangono da verificare tecniche di reimmissione di fertilizzante e di spazzolatura del fondo, che potrebbero migliorare i tempi di resistenza della coltura originale.

- la procedura di raccolta sperimentata è risultata piuttosto onerosa in termini di lavoro manuale necessario. Sarebbe auspicabile, ai fini di una produzione continuativa pre-commerciale, meccanizzare quanto più possibile le fasi di decantazione/raccolta.

In conclusione, si può comunque affermare che la specie microalgale testata nelle vasche ha risposto alle nuove condizioni ambientali adattandosi prontamente e sviluppandosi velocemente. Il sistema di coltivazione ha dimostrato buone potenzialità produttive pur con i limiti della prima serie e con l'impostazione assolutamente spartana e a basso costo. Sono state affrontate problematiche operative nuove, dovute all'aumento dei volumi e al relativo controllo ambientale. Si sono potute altresì raggiungere dimensioni produttive che hanno consentito l'immissione di biomassa algale in un digestore sperimentale da 6 m^3, presente presso il C.R. ENEA Casaccia e che viene impiegato per prove sul biogas (Figura 77).



Figura 77. Caricamento della soluzione acquosa di microalghe nel serbatoio di alimentazione del digestore pilota DMM6000

Il basso costo e la semplicità costruttiva del sistema di produzione "open pond" si riflettono positivamente sui bilanci energetici ed economici, sebbene l'esecuzione di elaborazioni dettagliate appaia ancora prematura in questa fase iniziale, caratterizzata più dalla ricerca di soluzioni per le maggiori problematiche operative che dal raggiungimento di produttività da considerare ottimali.

a.3 Gassificazione con acqua in condizioni supercritiche di biomasse ad elevato contenuto idrico

Obiettivo principale di questa attività era l'ottimizzazione del processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche (SCW) di biomasse ad elevato contenuto idrico per la produzione di un syngas con caratteristiche chimico-fisiche tali da renderlo idoneo per applicazioni energetiche.

Il lavoro svolto ha riguardato due aspetti fondamentali per un processo di SCWG: la modellazione termodinamica, il cui scopo è la valutazione delle caratteristiche del gas ottenuto, il confronto delle prestazioni del processo di gassificazione in SCW di differenti biomasse di interesse e la valutazione energetica del processo, nonché l'analisi sperimentale su un impianto bench scale al variare delle principali condizioni operative in modo da verificare le performance del processo sulle differenti matrici.

Il reattore utilizzato per la gassificazione di matrici organiche in acqua supercritica è un reattore tubolare in acciaio inossidabile T316, realizzato dalla Parr Instrument Co. (Moline, IL) avente volume disponibile totale di circa 450 mL, progettato per resistere ad una temperatura massima di 550 °C e pressione di 35 MPa. Il diametro interno è di 25 mm e il diametro esterno misura invece 48 mm, per uno spessore di 23 mm. La lunghezza totale è di circa 112 cm (teste incluse), ma la lunghezza riscaldata è di 90 cm.

L'impianto è inoltre predisposto per l'installazione di un sistema di preriscaldamento (costituito da una serpentina in acciaio interna al reattore nella quale il fluido circola per una lunghezza di circa 40 cm) in grado di portare il fluido di processo, precedentemente pressurizzato, fino alla temperatura di 300-350 °C (Figura 78).

Attraverso l'ausilio del controllore di processo, che gestisce la regolazione della potenza riscaldante, è possibile regolare la temperatura di processo desiderata ed allo stesso tempo effettuare il monitoraggio della stessa nella parte esterna al reattore. Il riscaldatore elettrico è dimensionato per garantire un carico complessivo di 2,4 kW.

La misura della pressione è duplice e viene effettuata in testa al reattore: attraverso il controllore di processo suddetto e mediante un manometro a tubo di Bourdon in acciaio inossidabile T316 che riporta una doppia scala, 0-350 bar e 0-5000 psi.



Figura 78. Sistema sperimentale di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche presso il C.R. ENEA Trisaia

Il reattore è inoltre fornito di supporti rimovibili per il contenimento di catalizzatori granulari. Tali supporti vengono comunque inseriti in modo da ridurre il volume del reattore al fine di avere tempi di permanenza inferiori e un migliore scambio termico. Nel caso in esame il volume del reattore è ridotto al valore di circa 220 mL.

La gassificazione in acqua supercritica consente il trattamento di matrici molto umide quali le biomasse tal quali, i fanghi di digestione, le microalghe etc., evitando di dover preventivamente sottoporle ad essiccamento. In seconda istanza si ha la produzione di un gas di sintesi ad elevate pressioni, che non solo si presta bene ad operazioni di recupero energetico per espansione, ma che soprattutto, può essere impiegato come sostituto del gas naturale a pressioni idonee all'immissione in rete nazionale di distribuzione; inoltre, le operazioni di assorbimento della CO_2 risultano facilitate dalle condizioni operative.

Variando opportunamente le condizioni operative è possibile spostare gli equilibri delle reazioni verso la produzione dei prodotti di maggiore interesse con conseguenti vantaggi economici rispetto ai processi convenzionali di pirolisi e gassificazione. Tuttavia a causa del complesso quadro di reazioni chimiche che entrano in gioco, quali le reazioni di pirolisi, la conseguente ossidazione parziale dei prodotti, la gassificazione del char, la conversione dei tar e degli idrocarburi più leggeri, la gestione e l'ottimizzazione del processo di SCWG risulta impegnativa quanto interessante.

L'attività sperimentale in tali condizioni di processo ha finora riguardato 2 matrici: glucosio e fango proveniente dal digestato di reflui zootecnici.

In merito all'analisi sperimentale condotta sull'impianto bench scale [rapporto RdS/PAR2013/130] non sono state riscontrate differenze rilevanti sulla resa e sulla composizione del gas e dei sottoprodotti liquidi al variare della concentrazione iniziale della soluzione di glucosio e della relativa portata di alimentazione. In generale, si è osservato un modesto aumento del contenuto di CO, CH_4 e C_2H_6 a scapito di H_2 con l'aumento della concentrazione iniziale. Di contro, la produzione di char, che ha causato il plugging del reattore, sembrerebbe fortemente legata ai due parametri operativi esaminati: infatti si è riscontrata una cospicua formazione di materiale solido soltanto nelle prove con alta concentrazione iniziale di biomassa e con alta portata di alimentazione.

Le prove su fango proveniente da un processo di digestione anaerobica di reflui zootecnici, di contro, hanno mostrato alcune differenze interessanti al variare della portata di alimentazione. Nello specifico, sono state effettuate due prove a differente portata di alimentazione. Entrambe le prove sono state condotte alla temperatura di 550 °C e alla pressione di 250 bar.

Nella Tabella 32 sono presentati i risultati delle prove sperimentali in termini di rapporto di produzione (RdP), efficienza globale di gassificazione (GGE), efficienza elementare di gassificazione (EGE), resa potenziale di idrogeno (HYP), resa percentuale di carbonio nella fase liquida (CLY), perdita percentuale di carbonio nei tar (CTAR) e produzione percentuale di char rispetto alla massa di biomassa alimentata.

La Tabella 33 riporta invece le composizioni molari medie dei prodotti gassosi nelle tre fasi salienti per ognuna delle prove effettuate. In base all'analisi delle concentrazioni medie per ognuna delle fasi sopra elencate è possibile notare come al variare della portata di alimentazione non si osserva un cambiamento rilevante nella distribuzione dei suddetti prodotti.

Tabella 32. Risultati delle prove sperimentali di SCWG del fango (T=550 °C, P=250 bar)

PROVA	Portata [mL/min]	RdP [L/g]	GGE [%]	EGE [%]			HYP [%]	CLY [%]	CTAR [%]	Char [wt %]
				C	H	O				
1	4	0,17	17,0	19,5	30,9	41,6	2,4	13,5	67,0	-
2	6	0,21	18,6	21,1	44,6	44,7	3,1	17,8	61,1	-

Tabella 33.Composizione del gas prodotto (% vol)

PROVA	Portata mL/min		H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8
1	4	START UP	27,1	27,3	30,1	11,7	2,4	1,3
		STEADY STATE	35,7	0,0	52,3	9,7	1,6	0,7
		DROP	40,5	0,3	41,9	13,5	2,8	1,2
2	6	START UP	53,4	0,0	34,3	10,2	1,3	0,8
		STEADY STATE	35,6	0,0	49,9	11,3	2,0	1,3
		DROP	45,6	0,0	35,9	14,7	2,5	1,3

La tabella 33 mostra anzitutto che, rispetto alle prove condotte con il solo glucosio, in condizioni pseudo-stazionarie, il monossido di carbonio risulta praticamente assente e quello che si ottiene è essenzialmente una miscela composta per circa il 50% in volume da idrogeno e specie C+ (metano, etano e propano) e la restante parte da CO_2, facilmente separabile in tali condizioni operative.

Il ridotto numero di test non permette di poter avanzare interpretazioni in merito all'influenza della portata sulla qualità del gas ottenuto. Ciò nonostante, per entrambe le prove sperimentali, ripetute in triplo, non si è riscontrato plugging del reattore.

In termini di qualità della fase liquida ottenuta, in analogia con i test nel quale l'alimentazione era costituita da glucosio, è possibile evidenziare la presenza di una specie maggioritaria, quale l'acido acetico, sebbene con concentrazioni nettamente inferiori rispetto a quelle ottenute con glucosio quale alimentazione.

Le prove sul fango, in sostanza, hanno evidenziato che, all'aumentare della portata di alimentazione, si ha un aumento per i valori del rapporto di produzione, dell'efficienza globale di gassificazione, dell'efficienza elementare di gassificazione, della resa potenziale di idrogeno e della resa percentuale di carbonio nella fase liquida, mentre si ha una riduzione della perdita percentuale di carbonio nei tar. In particolare, le biomasse con un contenuto di umidità maggiore hanno mostrato una resa in idrogeno all'equilibrio maggiore rispetto agli altri materiali utilizzati ed un significativo decremento della frazione di anidride carbonica prodotta, a vantaggio della qualità energetica del syngas ottenibile.

Per quanto attinente ai bilanci energetici, è stata confermata la ridotta incidenza della compressione del liquido, rispetto alla quantità di energia potenzialmente recuperabile dell'espansione del gas. Inoltre le differenti biomasse hanno presentato differenze apprezzabili nella potenza energetica 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 prodotto sotto forma di CO_2.

Al fine di valutare in maniera corretta l'effetto della reazione sui catalizzatori a base Co-Mo da utilizzare nel processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche, gli stessi sono stati sottoposti, presso i laboratori dell'Università della Calabria, a completa caratterizzazione chimico fisica con l'obiettivo di valutarne le caratteristiche prima e successivamente al loro utilizzo nel processo parametrizzandone la stabilità meccanica, la selettività e l'attività catalitica in funzione delle severe condizioni operative [rapporto RdS/PAR2013/125]. Nello specifico, si sono analizzate le caratteristiche chimico-fisiche di due catalizzatori Ni-Mo da utilizzare nella sperimentazione di SCWG di biomasse. La composizione dei campioni in oggetto è riportata nella tabella 34.

Tabella 34. Analisi chimica elementare dei campioni di catalizzatore

Elemento	Campione 1	Campione 2
Ni [μg/mg]	38,4	0,300
Mo [μg/mg]	18,4	20,9
Al [μg/mg]	325	235

Entrambi i catalizzatori sono supportati su allumina ed il tenore di molibdeno è molto simile. Lo stesso non può

dirsi per il nichel che risulta molto più presente (circa 15 volte) nel campione 1 rispetto al campione 2.

Le prove di caratterizzazione, oltre all'analisi chimica, hanno riguardato le misure di DTA (differential thermal analysis) e TGA (thermal gravimetric analysis). Le prove sono state effettuate sia in atmosfera inerte (azoto) che in aria in maniera da evidenziare eventuali effetti ossidativi (combustioni) riscaldando il campione da 25 a 850 °C, ed hanno evidenziato una buona stabilità di entrambi i campioni fino a 750 °C e l'assenza di fenomeni chimici ad eccezione del desorbimento dell'acqua presente, che si esaurisce intorno ai 250 °C.

La Figura 79 mostra i risultati dell'analisi DTA in azoto riferita ai campioni 1 e 2. Nel caso del campione 1 è visibile un picco endotermico che ha il massimo intorno ai 100°C e termina la propria efficacia intorno ai 250 °C. Tale picco è da attribuirsi all'umidità contenuta nel campione che viene desorbita intorno a quelle temperature. Un comportamento simile si è osservato per il campione 2 Inoltre, al di sopra di tale temperatura, entrambi i campioni mostrano un comportamento inerte fino a circa 750 °C.

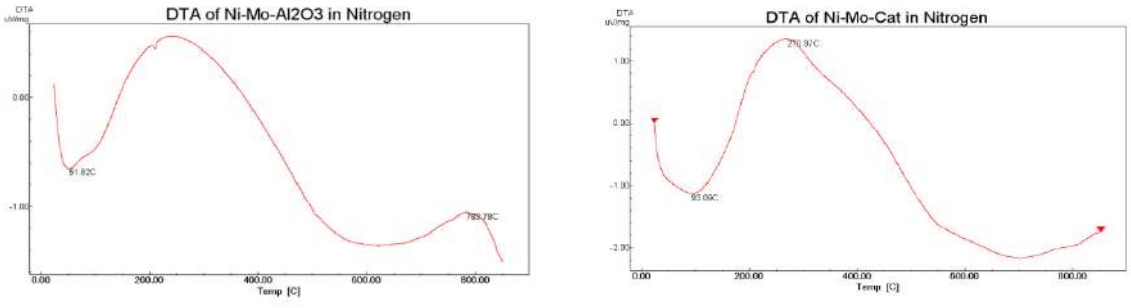


Figura 79. Analisi DTA in azoto dei campioni 1 e 2

Anche le prove di porosimetria hanno evidenziato un comportamento simile di entrambi i materiali con sostanziali differenze solo nella microporosità.

Prove preliminari condotte utilizzando questi catalizzatori in SCWG, seppure in condizioni di processo non ottimizzate, hanno evidenziato un modesto aumento della frazione gassosa (a vantaggio del tenore in idrogeno) cui fa da contraltare una significativa formazione di deposito carbonioso che deprime rapidamente l'efficacia del catalizzatore.

In conclusione, diverse sono ancora le criticità per uno sviluppo della tecnologia di gassificazione SCW su più ampia scala e diversi sono ancora gli sforzi da fare nell'ambito della ricerca per sostenerne lo sviluppo industriale, anche se questa tipologia di processo continua ad essere in prospettive molto attraente per la sua versatilità nelle materie prime gassificabili e nei prodotti ottenibili dal processo condotto in condizioni controllate, specie se il processo stesso è inserito all'interno di un ciclo a vapore per la produzione congiunta di energia elettrica, oltre al syngas ottenibile direttamente pressurizzato, cosa che lo rende particolarmente vantaggioso nelle differenti vie di sintesi che portano alla produzione di biocombustibili sia gassosi (idrogeno, biometano) che liquidi (metanolo/etanolo/DME).

b. Sviluppo di sistemi di upgrading di biocombustibili e riduzione dell'impatto ambientale

Le attività relative a questo obiettivo hanno riguardato in particolare:

- l'arricchimento del biogas in metano e la rimozione dei contaminati fino a livelli tali da consentirne l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale, escludendo quelle tecniche che richiedono l'impiego di sistemi a temperature superiori a 150 °C;
- lo sviluppo del processo di purificazione e di metanazione del syngas prodotto da un impianto di gassificazione.

Nello specifico, le attività relative all'abbattimento dei contaminanti e di upgrading del biogas condotte in ENEA sono state indirizzate principalmente allo sviluppo di sistemi e metodologie da accoppiare al digestore pilota DMM6000 in funzione presso il C.R. ENEA della Casaccia.

Il digestore anaerobico pilota ha lavorato in continuo, 24 h su 24 h, 365 giorni l'anno, per l'intera annualità. E' stato alimentato esclusivamente con gli scarti della mensa presente presso il Centro della Casaccia (sostanza secca variabile fra il 16 e il 25% in peso), producendo una portata costante di biogas di circa 1,2-1,5 L/min. Durante il

corso delle attività il carico di alimentazione è stato aumentato per valutare la risposta del digestore, arrivando a produrre fino a 3 L/min [rapporto RdS/PAR2013/248].

La composizione misurata del biogas prodotto si è mantenuta all'interno dei seguenti valori:

- CH_4 60÷67%
- CO_2 33÷40%
- H_2S 250÷380 ppm.

b.1 Processi chimico-fisici o biologici innovativi per l'abbattimento dell'acido solfidrico presente nel biogas

Per la rimozione dell'H_2S, le tecnologie chimico-fisiche adottate e poste a confronto sono quelle basate sull'utilizzo di carboni attivi (processo di adsorbimento) e di ossidi metallici (reazione catalitica).

Per entrambi i processi gli studi sono continuati sia a livello di laboratorio, con l'obiettivo di ottimizzare le condizioni operative, ossia massimizzare la quantità di H_2S rimosso dal biogas a parità di carbone o catalizzatore utilizzato minimizzando i consumi energetici, che su dispositivi accoppiati direttamente al digestore pilota, utilizzando dunque come biogas da trattare un biogas reale prodotto contestualmente.

Il processo di adsorbimento di H_2S da parte di carboni attivi funzionalizzati può essere un processo di tipo misto chimico-fisico: il composto viene adsorbito sulla superficie e successivamente si ossida con una reazione di ossidazione selettiva catalizzata dalla presenza di ossidi di metallo sul carbone stesso.

I carboni attivi sono pertanto caratterizzati da una superficie specifica più alta possibile e da un processo di funzionalizzazione ottenuto impregnando la superficie del carbone attivo con ossidi di metalli diversi. I prodotti di reazione alle temperature più basse, T_{reaz} < 150 °C, sono: zolfo, che rimane intrappolato sulla superficie del carbone e acqua e, in misura minore, SO_2. A temperature più elevate comincia ad essere selettiva la reazione di formazione di SO_2 (indesiderata).

Due carboni attivi, RGM3 della NORIT e AIRPEL ULTRA DS della DESOTEC, sono stati testati nl corso dell'attività, sia in un sistema da laboratorio con reattore di quarzo e biogas da bombola, sia in reattore pilota di circa 20 mm di diametro, operante con biogas reale proveniente dal digestore anaerobico DMM6000. Entrambi sono carboni attivi commerciali ad elevata superficie specifica e funzionalizzati per l'adsorbimento di H_2S, nominalmente ottimizzati per lavorare in diversi range operativi, RGM3 con biogas secco, AIRPEL con biogas a un tasso di umidità relativa compresa tra 70% e 90%.

Un aspetto molto importante per quello che riguarda l'efficienza dei carboni nell'abbattimento di inquinanti è l'effetto sinergico di diversi contaminanti e di diversi gas presenti nel biogas. L'effetto della matrice biogas sull'abbattimento dell'H_2S è evidente sovrapponendo nello stesso grafico (Figura 80) la curva di dipendenza della capacità di adsorbimento del carbone RGM3 dalla percentuale di O_2 su H_2S ottenuta in presenza di biogas + N_2 + O_2 con la curva ottenuta nelle medesime condizioni quando il flusso in ingresso al reattore è costituito dalla medesima concentrazione di H_2S + N_2 + O_2.

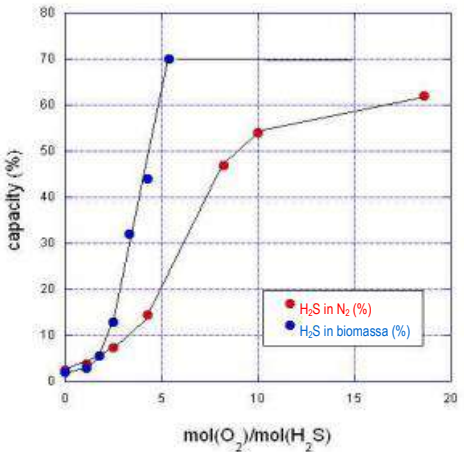


Figura 80. Capacità del carbone al variare del rapporto O_2/H_2S nel gas da trattare

I campioni che hanno adsorbito H_2S in un flusso di biogas mostrano a parità di rapporto molare O_2/H_2S una capacità notevolmente più alta di quelli in flusso di azoto. Per entrambe i carboni testati, le prove in matrice di biogas hanno dato valori di capacità più alti a parità di condizioni, evidenziando un possibile ruolo attivo e positivo della CO_2 nel processo di ossidazione parziale dell'H_2S del tutto inatteso.

Nel caso specifico della prove con biogas reale, il letto adsorbente era formato da circa 6 g di carboni attivi di granulometria 710-1.000 mm. Il biogas, che esce dal DMM6000 in condizioni di saturazione è stato inviato al reattore tal quale (presente sulla linea di ingresso al reattore solo un filtro meccanico per la rimozione di eventuali particelle ed un Mass Flow Meter per la misura della portata del biogas prodotto) senza essere stato preventivamente disidratato, come originariamente previsto, in quanto non è stato possibile acquisire in tempo utile il gruppo frigorifero richiesto per l'operazione.

I test eseguiti non hanno quindi confermato i risultati ottenuti a livello di laboratorio, ossia le capacità dei carboni provati si sono mantenute molto più basse, anche per il carbone AIRPEL ULTRA DS, sebbene sia considerato adatto a lavorare in condizioni di gas umido: in sostanza, l'H_2S viene regolarmente rimosso, ma il dispositivo di abbattimento si satura molto prima (con un rapporto di circa 1/10) poiché i pori utilizzati dal carbone per la "cattura" dell'H_2S vengono invece occupati dall'H_2O presente nel biogas.

Ossidazione parziale catalitica selettiva di H_2S in biogas a bassa temperatura

Nella precedente annualità della RdS sono stati formulati e preparati, presso i laboratori dell'Università di Salerno, catalizzatori strutturati a base di V_2O_5/CeO_2 per la purificazione di biogas da H_2S mediante la reazione di ossidazione parziale selettiva di H_2S a zolfo. Tali catalizzatori sono risultati attivi e molto selettivi nell'intervallo di temperatura di 150-200 °C in condizioni di rapporto di alimentazione stechiometrico.

Poiché l'obiettivo principale è quello di ridurre al minimo la formazione di SO_2, per mantenere elevata la selettività del sistema a zolfo utilizzando un biogas reale, che contiene comunque un quantitativo di ossigeno superiore a quello stechiometrico, sono state esplorate condizioni operative con eccesso di ossigeno in alimentazione.

Pertanto, nella prima parte delle attività, sono stati preparati e caratterizzati nuovi catalizzatori in polvere V_2O_5/CeO_2 con un carico nominale di fase attiva pari al 20%, quale carico ottimale ottenuto da prove condotte negli anni precedenti.

Di tali campioni è stata valutata l'attività catalitica, la selettività del sistema allo zolfo al variare delle condizioni operative di temperatura, di tempo di contatto e di rapporto di alimentazione [rapporto RdS/PAR2013/236].

Risultati interessanti sono stati ottenuti dalle prove sperimentali all'aumentare del tempo di contatto da 40 a 240 ms, che hanno evidenziato la possibilità di lavorare anche in condizioni di più bassa temperatura (80 °C), alla quale sono state ottenute buone prestazioni catalitiche, conseguendo una conversione di H_2S quasi totale (99%) e una selettività ad SO_2 trascurabile (<1%, pari a una concentrazione di circa 3 ppm nel gas in uscita dal trattamento), come mostrato nel grafico della Figura 81.

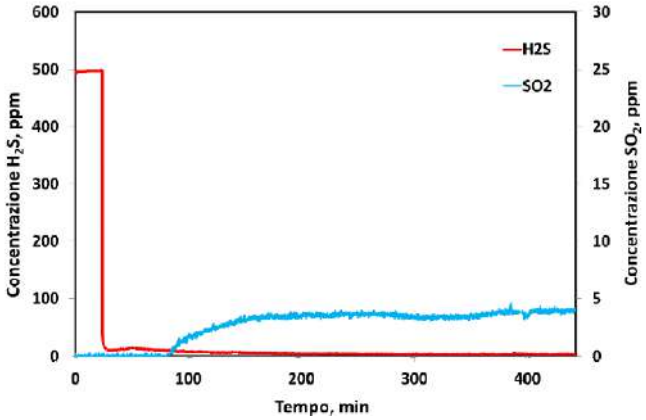


Figura 81. Prova di attività catalitica a τ = 240 ms (Q_{TOT}=400 Ncc/min, T=80 °C, O_2/H_2S =0,5)

L'impiego di un rapporto di alimentazione superiore allo stechiometrico alla temperatura di 80 °C, non ha modificato sensibilmente la conversione dell'H_2S, che è rimasta pressoché totale, ed ha influenzato solo leggermente la selettività del sistema ad SO_2 (Tabella 35).

Tabella 35. Dati di riepilogo delle prove di ossidazione catalitica (xH_2S, SO_2 ppm, ySO_2) al variare del rapporto di alimentazione O_2/H_2S

O_2/H_2S	xH_2S, %	SO_2, ppm	Y SO_2, %
0,5	99	4	0,8
1	99	25	5
1,5	98,2	28	5,7

Infatti per rapporti O_2/H_2S=1-1,5 la massima concentrazione di SO_2 è stata di circa 30 ppm, corrispondente ad valore di selettività a zolfo intorno al 94%.

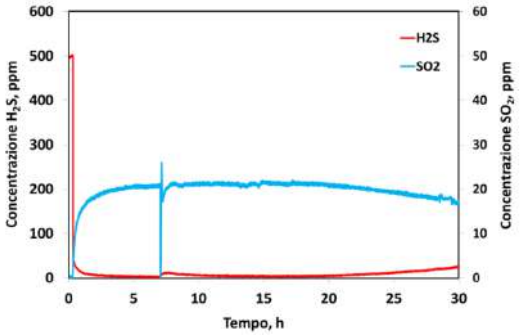


Figura 82. Prova di durata per il catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2 a T=80 °C, τ=240 ms, O_2/H_2S=1

Sulla base dei risultati ottenuti sono state individuate le condizioni operative ottimali di temperatura (80 °C), tempo di contatto (240 ms) e rapporto di alimentazione (O_2/H_2S = 1). In queste condizioni, è stata effettuata una prova di stabilità del catalizzatore della durata di 30 h.

Il catalizzatore è risultato molto attivo e completamente stabile nelle prime 20 h di prova, come si evince dagli andamenti delle concentrazione di H_2S ed SO_2 che sono stati piuttosto stabili (Figura 82). La conversione di H_2S è risultata quasi totale, mentre la concentrazione di SO_2 in uscita è stata di 20 ppm.

Una tendenza alla disattivazione è stata riscontrata per una durata maggiore della prova, probabilmente legata alla condensazione dello zolfo nelle porosità del catalizzatore, che a causa della bassa temperatura di reazione (80 °C) non è in grado di liberare la superficie. A conferma di questa ipotesi, i risultati della stessa prova effettuata a 120 °C dopo 30 h non hanno indicato alcun tipo di disattivazione.

Ossidazione parziale selettiva di H_2S a zolfo a bassa temperatura mediante attivazione fotocatalitica

L'Università di Salerno in passato ha studiato sistemi fotocatalitici in grado di rimuovere l'idrogeno solforato, per cui si è voluto approfondire tale ricerca in modo da verificare che l'ulteriore soluzione al problema della richiesta di una maggiore selettività verso l'ossidazione dell'H_2S a S e non a SO_2 anche in condizioni di eccesso di ossigeno (rapporti ossigeno/H_2S maggiori di 0,5) ed a temperature inferiori a 100 °C.

Sono stati pertanto condotti test di ossidazione selettiva in un reattore fotocatalitico a letto fluido [Rapporto RdS/PAR2013/237] per verificare la possibilità di superare i limiti termodinamici di conversione e selettività individuati con le prove effettuate, nell'ambito della presente annualità della RdS, utilizzando gli stessi catalizzatori a base di V_2O_5/CeO_2 a temperature tra gli 80 ed i 120 °C, con l'obiettivo di abbassare la temperatura operativa a valori inferiori.

In particolare, con questa attività di ricerca è stata valutata la possibilità di applicare un sistema fotocatalitico per l'abbattimento dell'H_2S in biogas. Lo studio è stato condotto determinando l'attività e la selettività sotto irradiazione di radiazioni UV del catalizzatore a base di V_2O_5/CeO_2 sopra menzionato. Per la realizzazione delle prove è stato impiegato un fotoreattore a letto fluido appositamente realizzato in acciaio, dotato di guarnizioni in grafite. Il reattore è stato illuminato da quattro lampade UV con una lunghezza d'onda della radiazione emessa di 365 nm, posizionate in prossimità delle pareti esterne del reattore e realizzate in pyrex.

Il catalizzatore 20% V_2O_5/CeO_2, pur non essendo specificamente preparato per essere impiegato in presenza di radiazioni UV, ha mostrato comunque una certa attività e selettività nei confronti della reazione di ossidazione parziale dell'H_2S, anche a temperature molto inferiori a quelle in cui è tipicamente attivo. I risultati sperimentali hanno evidenziato una parziale conversione dell'H_2S ed una diminuzione della concentrazione di SO_2 alla temperatura di 50 e 65 °C, come si osserva in particolare dal grafico riportato nella Figura 83.

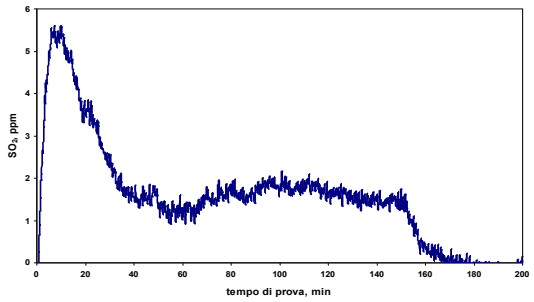


Figura 83. Andamento della concentrazione di SO_2 in funzione del tempo di prova. Portata tot. 39 NL/h, $T_{reazione}$ 50 °C

In assenza di radiazioni luminose, la formazione di SO_2 ha raggiunto un massimo pari a circa 9 ppm dopo 9 min, per poi diminuire, e si è stabilizzata dopo circa 50 min, attestandosi ad un valore pari a circa 2 ppm. All'atto della accensione della sorgente UV, la concentrazione di SO_2 è diminuita in modo repentino, fino ad un valore prossimo allo zero.

In tutte le condizioni operative investigate, date le basse temperature applicate, si è ottenuta una conversione non completa dell'H_2S e sono stati anche osservati evidenti fenomeni di disattivazione del catalizzatore, legati probabilmente all'adsorbimento e successiva ossidazione dell'anidride solforosa SO_2 sul supporto del catalizzatore, con formazione di solfati stabili difficilmente desorbibili.

Ad ogni modo, i risultati sperimentali hanno evidenziato che la presenza di radiazione UV è in grado di inibire la formazione di SO_2 alla temperatura di 50 °C e di farla diminuire alla temperatura di 65 °C. Tale fenomeno può

essere spiegato considerando che, in presenza di CeO_2, l'anidride solforosa SO_2 è probabilmente ossidata ad anidride solforica (SO_3) causando una diminuzione della concentrazione di SO_2 nella fase gassosa. L'anidride solforica formata è pero non in grado di desorbire dalla superficie del catalizzatore, trasformandosi in solfato di superficie, determinando una progressiva disattivazione dello stesso, come riscontrato nelle prove sperimentali.

In definitiva, si può concludere che, operando in presenza di radiazioni UV, senza apportare modifiche sostanziali alla sua composizione non è possibile estendere verso le basse temperature l'attività del sistema V_2O_5/CeO_2, ma per rendere più efficace tale soluzione sarebbe necessario sviluppare uno specifico fotocatalizzatore, modificando innanzitutto la natura del supporto, in modo da renderlo capace di fotoattivare le molecole di H_2S adsorbite sulla sua superficie.

Analogamente a quanto eseguito con i carboni attivi, sono stati condotti dei test di rimozione dell'H_2S presente nel biogas reale sfruttando la reazione di ossidazione selettiva promossa in presenza di catalizzatori V_2O_5. Nello specifico, i catalizzatori sono stati caricati nel reattore alimentato con biogas sotto forma di monolite (Figura 84) ed i test sono stati condotti cercando di replicare le condizioni del laboratorio.

Anche in questo caso la presenza di umidità nel gas non ha permesso di raggiungere i risultati attesi e la conversione dell'H_2S non ha mai raggiunto i valori > 90% ottenuti in laboratorio. I test saranno pertanto ripetuti una volta istallato il sistema frigorifero a valle del digestore.



Figura 84. Monolite con V_2O_5 per l'ossidazione selettiva dell'H_2S

Studio e sperimentazione di metodi biologici per la purificazione del biogas

L'obiettivo della ricerca è quello sviluppare un metodo biologico efficace e a basso costo per abbattere il contenuto in idrogeno solforato (H_2S) del biogas.

Le attività di ricerca si sono rivolte allo studio del processo di fotosintesi anossigenica, operata dal batterio *Chlorobium limicola*, mediante il quale L'H_2S viene convertito in zolfo elementare secondo la reazione:

$$2n\ H_2S + n\ CO_2 + h\nu \rightarrow 2n\ S^0 + n\ (CH_2O) + n\ H_2O$$

Lo studio è stato avviato nelle due precedenti annualità dell'Accordo di Programma e nell'ambito delle attività del PAR 2013 l'obiettivo specifico della ricerca è stato quello di dimostrare la fattibilità del processo su scala di laboratorio, ma in continuo, collegando un fotobioreattore (3 L, di tipo CSTR) contenente una coltura attiva di *C. limicola* ad un piccolo impianto pilota di DA in funzione presso lo stesso laboratorio.

Sono state effettuate due prove in continuo, nelle quali il fabbisogno di solfuro è stato assicurato fornendo rispettivamente biogas proveniente dal digestore pilota e una miscela sintetica di biogas contenente H_2S.

Il fotobioreattore è esposto alla luce in un illuminatore multispettrale, progettato sulla base dello spettro di assorbimento di *C. limicola,* dotato di LED monocromatici alle lunghezze d'onda 400, 720, 770, 810, 900, 1000 nm collocati su tre linee (8 LED per ciascuna lunghezza d'onda) disposte a 120°. I LED di ciascuna lunghezza d'onda possono essere accesi indipendentemente l'uno dall'altro e regolati in intensità luminosa.

Nel primo esperimento il fotobioreattore è stato inserito a valle di un impianto pilota di DA alimentato a scotta, facendo gorgogliare il biogas prodotto nella coltura batterica e monitorando la concentrazione di H_2S in entrata e in uscita. Per tutta la durata dell'esperimento, il biogas (composizione %: CH_4 57, CO_2 41, O_2 0,1, H_2 0,02, H_2S 0,06) ha mantenuto un flusso di circa 20 ml min^{-1} e una concentrazione di H_2S intorno a 600 ppm. Al FBR è stata fornita una irradianza di 1 W m^{-2}. La concentrazione di H_2S nel biogas "purificato" in uscita dal FBR si è attestata intorno a 34 ppm (Figura 85).

Il processo ha mostrato un'efficienza media intorno al 95% per l'intera durata dell'esperimento. Dal grafico si osserva che la concentrazione dell'H_2S in uscita è costante, mentre è variabile in entrata. Sono state effettuate anche delle prove di bianco (fotobioreattore caricato con il solo terreno di coltura ma senza inoculo batterico) e di buio (FBR non illuminato). In queste due prove la concentrazione di H_2S in uscita dal sistema risulta di circa il 10% inferiore a quella in entrata per effetto della parziale dissoluzione del solfuro nella fase liquida.

Durante tutto l'esperimento non sono stati rilevati solfuri disciolti e non c'è stato accumulo di SO_4^{2-}. Inoltre, la coltura batterica non si è sviluppata in maniera significativa, in quanto la concentrazione di batterioclorofilla *c* (BChl *c*), indicatore della biomassa batterica, ha subito un incremento modesto, passando da 4,1 a 4,6 mg L^{-1}.

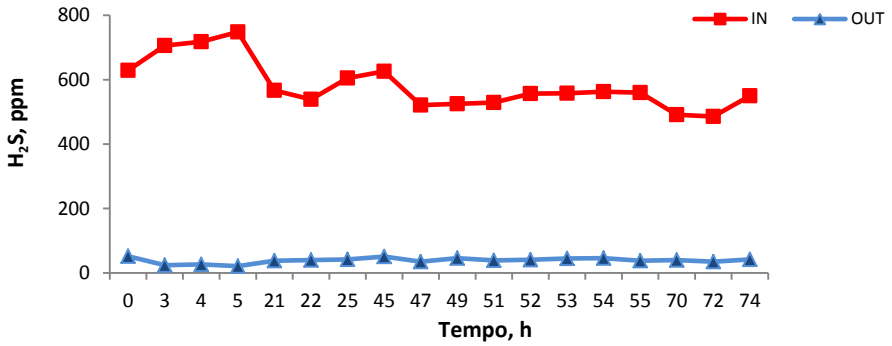


Figura 85. Concentrazione di H_2S nel biogas prodotto da un impianto di DA in entrata e in uscitadal fotobioreattore nei quattro giorni di durata dell'esperimento

Nel secondo esperimento si è voluto testare il fotobioreattore con una più alta concentrazione di H_2S. L'esperimento è stato condotto alimentando il fotobioreattore (FBR) con biogas sintetico contenente 2.000 ppm di H_2S e mantenendo il flusso a 20 mL min^{-1} nelle stesse condizioni di illuminazione dell'esperimento precedente. L'abbattimento dell'H_2S si è attestato intorno a 86% (H_2S 282 ppm) nel primo giorno di attività fino ad arrivare all'80% nel quinto (H_2S 400 ppm), come mostrato in Figura 86.

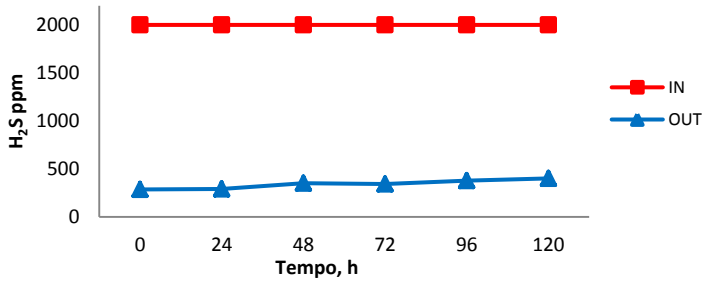


Figura 86. Concentrazione di H_2S nel biogas sintetico in entrata ed in uscita dal FBR

Per tutta la durata dell'esperimento, le analisi dei solfuri disciolti sono risultate negative, per cui si ritiene che il parziale (seppur alto) abbattimento possa essere attribuito alla mancata solubilizzazione del solfuro durante il gorgogliamento del biogas all'interno del FBR. Per effetto della più elevata concentrazione dell'idrogeno solforato in entrata, la biomassa batterica si è sviluppata in misura maggiore rispetto all'esperimento precedente, con un incremento del contenuto in BChl *c* da 4,5 a 5,6 mg L^{-1}.

In conclusione, si può affermare che i risultati ottenuti sono incoraggianti in quanto dimostrano che l'abbattimento, anche se non totale, avviene anche a concentrazioni elevate di H_2S e, in linea di principio, a costi molto bassi.

La tecnologia sperimentata presenta le potenzialità per essere utilizzata nei processi di clean up del biogas, operando delle modifiche che consentano una più efficiente solubilizzazione dell'H_2S dal biogas da trattare. Il processo mostra anche una buona sostenibilità economica se si considera l'esiguo consumo di energia (1wm^{-2}) che serve a fornire al filtro biologico l'illuminazione specifica con l'impiego dei fotodiodi LED.

b.2 Nuovi sistemi per la rimozione selettiva della CO_2 dal biogas basati sull'impiego di ammine in fase organica e sulla formazione-dissociazione selettiva di gas idrati

Sviluppo di un processo di separazione della CO_2 dal biogas mediante assorbimento con soluzioni amminiche in solvente organico

L'assorbimento della CO_2 con soluzione di ammine in solventi organici protici è un processo innovativo per l'upgrading del biogas a biometano. L'uso di un solvente organico protico dovrebbe permettere di superare i limiti del processo di assorbimento con ammine in acqua, soprattutto in base alla possibilità di operare il desorbimento

della CO_2 a temperatura più bassa, riducendo in questo modo la perdita di ammina per evaporazione e degradazione, la corrosione degli impianti e il consumo di energia per la rigenerazione.

In particolare, sembra molto interessante l'uso di ammine stericamente impedite, come il 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP) in miscele di glicol etilenico e propanolo. E' da notare che, oltre a presentare caratteristiche interessanti in termini di capacità di assorbimento-desorbimento, questa ammina ha anche una buona stabilità termica e alla degradazione ossidativa.

Presso i laboratori della Sapienza Università di Roma è stata condotta una sperimentazione finalizzata a valutare la capacità di assorbimento della CO_2 nella soluzione amminica nelle diverse condizioni operative, la cinetica di assorbimento e le modalità di un'efficace rigenerazione [rapporto RdS/PAR2013/253].

Le prove sono state condotte con una portata di gas totale pari a 0,5 L/min (assorbimento) o 0,25 L/min (rigenerazione). Una volta fissati i parametri della prova e termostatato il sistema, è stato avviato l'assorbimento utilizzando una miscela CO_2/N_2 (o CO_2/CH_4) a composizione percentuale volumica definita.

Ciascuna prova di assorbimento è stata condotta fino a esaurimento della capacità assorbente della soluzione, tranne in alcune prove condotte fino a sfruttamento parziale di tale capacità assorbente. Una volta completata la fase di assorbimento, la soluzione assorbente è stata rigenerata mediante desorbimento della CO_2 alla temperatura prescelta in flusso di azoto (portata pari a 0,25 L/min) e sottoposta quindi a un successivo ciclo di assorbimento-desorbimento. Per ogni test effettuato sono stati eseguiti un numero minimo di 3 cicli di assorbimento-desorbimento, registrando i dati di concentrazione di CO_2 negli effluenti dall'assorbitore/ desorbitore in funzione del tempo.

Le prove di assorbimento/desorbimento sono state eseguite variando i seguenti parametri:

- concentrazione dell'AMP: 1,7 M; 2,3 M
- composizione della miscela solvente: n-propanolo (P), i-propanolo (IP), glicol etilenico (GE); GE/P=1; GE/IP=1; GE/P = 0,5; GE/IP = 0,5
- percentuale di CO_2 nella corrente gassosa: in N_2 con CO_2 30%; 50%; 70%, in CH_4 con CO_2 30%
- temperatura di assorbimento: 25 °C; 35 °C
- temperatura di desorbimento: 90 °C; 80 °C; 70 °C
- tempo: fino a esaurimento della capacità assorbente; fino a raggiungimento di loading predefinito
- umidità del gas: secco e saturo a 25 °C.

La sperimentazione condotta in un sistema semi-batch in cui sono realizzati cicli ripetuti di assorbimento della CO_2 in soluzione amminica (AMP in miscele glicol etilenico e propanolo) e rigenerazione della soluzione in corrente di azoto ha evidenziato che si possono ottenere loading (moli di CO_2 assorbita per mole di ammina) intorno al 50% con gas al 30% di CO_2 e intorno all'80% con gas al 50 o al 70% di CO_2 (Figura 87).

Si è evidenziato, inoltre, che è possibile rigenerare in mofo efficace la soluzione amminica operando a temperature inferiori ai 100 °C; a 70 °C il tempo di rigenerazione è di circa 12 min, mentre scende a poco più di 5 min a 90 °C.

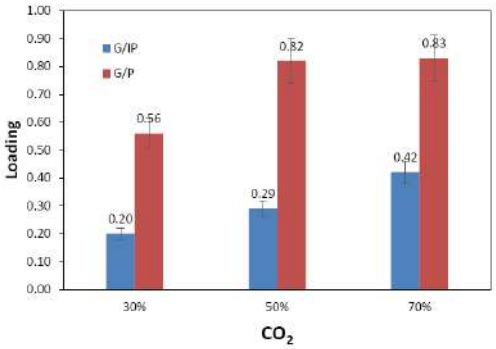


Figura 87. Effetto della composizione del gas sul loading

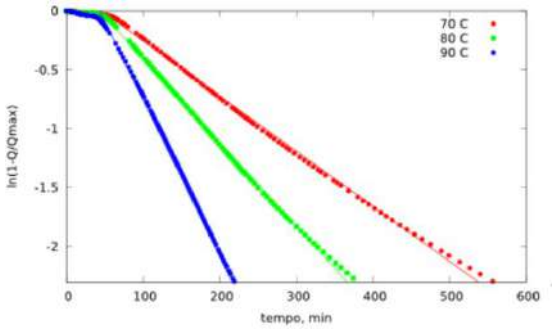


Figura 88. Correlazione dei dati sulla cinetica di rigenerazione dell'ammina

Sulla base dei risultati ottenuti è stata descritta la velocità dell'assorbimento chimico della CO_2 in soluzioni glicol etilenico - propanolo con una cinetica apparente del primo ordine rispetto alla concentrazione di CO_2 molecolare presente in soluzione e con la concentrazione di ammina libera, con una costante cinetica dell'ordine di 0,03 $(s\ moli/L)^{-1}$. La cinetica di rigenerazione può essere descritta come una cinetica del primo ordine rispetto alla concentrazione del complesso ammina-CO_2, con costante cinetica di circa 0,005 s^{-1} a 70 °C e 0,013 s^{-1} a 90 °C (Figura 88).

I dati sono relativi ai cicli di assorbimento e rigenerazione condotti con gas al 30% di CO_2 e 70% di azoto con soluzioni

G-P 1,7 M di AMP.

I dati acquisiti nella sperimentazione sono stati utilizzati insieme ai dati reperiti nella letteratura per un'analisi di fattibilità tecnico-economica di un processo di upgrading del biogas mediante assorbimento della CO_2 con soluzioni di AMP in una miscela di glicol etilenico e n-propanolo. A tale scopo sono state dapprima analizzate separatamente le unità di assorbimento della CO_2 con la soluzione amminica e di rigenerazione della soluzione amminica utilizzata, per individuare le condizioni operative da utilizzare ed effettuare un dimensionamento di massima delle principali unità. Successivamente, si è considerato lo schema del processo completo, costituito dalle unità di assorbimento e rigenerazione.

L'analisi effettuata ha consentito di procedere ad una valutazione di massima delle condizioni operative per l'upgrading del biogas a biometano, dei consumi energetici (in termini di potenza elettrica e termica) e dei costi di investimento e di esercizio di un impianto di upgrading in modo da poter confrontare il processo innovativo proposto con i processi di upgrading più spesso adottati.

Il biogas, proveniente dal digestore, dopo i necessari pretrattamenti, viene compresso fino alla pressione di esercizio della colonna di assorbimento e raffreddato fino alla temperatura di 25 °C e quindi inviato alla colonna di assorbimento in controcorrente con la soluzione glicol-n-propanolo (1:1 vol.) con una concentrazione di ammina 2,3 M.

La soluzione amminica ricca di CO_2 (AMMINA RICH) uscente dalla colonna a una temperatura intorno ai 40 °C, viene riscaldata fino alla temperatura di 80 °C e inviata all'unità di rigenerazione. Sulla base delle analisi effettuate, si è considerato di realizzare la rigenerazione combinando il riscaldamento della soluzione con lo stripping con aria calda.

Dall'unità di rigenerazione si ottiene una corrente gassosa costituita da aria e CO_2, contenente quantità significative di solventi organici (glicol e soprattutto propanolo) e ammina. Per recuperare questi componenti la corrente gassosa viene raffreddata, ottenendo un off-gas contenente circa il 50% di CO_2 e il 4,5% di organici volatili (CH_4 e propanolo) e una corrente liquida costituita prevalentemente da propanolo e ammina che viene riciclata. La soluzione di ammina rigenerata (AMMNIA LEAN), a temperatura elevata, viene raffreddata prima recuperando il calore per il riscaldamento della soluzione di ammina RICH e quindi in uno scambiatore ad acqua: La soluzione, insieme al condensato ottenuto dal gas di testa e alla necessaria corrente di reintegro del propanolo, viene riciclata alla colonna di assorbimento.

Nella Figura 89 è riportato uno schema completo di un processo di upgrading, comprendente sia l'unità di assorbimento sia l'unità di rigenerazione.

Poiché la soluzione di ammina rigenerata ha un contenuto non trascurabile di CO_2, per ottenere le specifiche di separazione desiderate e, in particolare, per garantire la purezza del CH_4 nella corrente di biometano, è necessario modificare leggermente le condizioni operative rispetto a quanto determinato nell'analisi delle singole unità di assorbimento e rigenerazione: per questo si è scelto di aumentare la pressione di esercizio della colonna a 2,5 atm e si è determinato il valore della portata di soluzione amminica circolante necessaria per il raggiungimento delle specifiche.

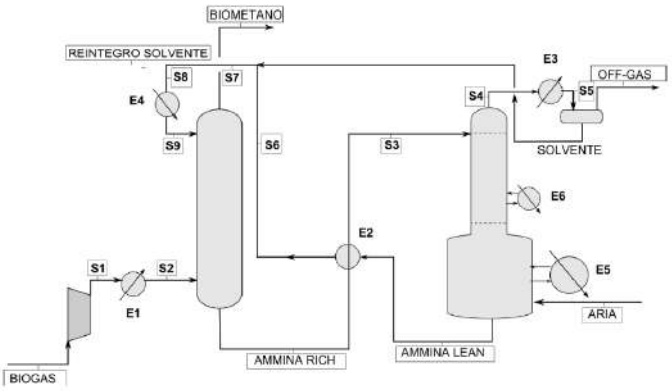


Figura 89. Schema del processo di upgrading del biogas, comprendente l'unità di assorbimento e l'unità di rigenerazione

In conclusione, sulla base delle informazioni reperite in letteratura e dei risultati ottenuti nella sperimentazione, si è quantificato lo schema di un processo di assorbimento e rigenerazione che permette di ottenere un biometano al 97% di metano, con un recupero di quest'ultimo superiore al 98%. Con riferimento all'upgrading di 500 Nm^3/h di biogas, è stato valutato che il processo richiede un consumo di energia termica di 2,5-3 kJ/kg di CO_2 assorbita, corrispondenti a 5,7 kJ/Nm^3 di biogas prodotto se la concentrazione di CH_4 nel biogas è del 50%, che si riduce a 2,5 kJ/Nm^3 se il biogas contiene il 70% di metano.

I costi dell'upgrading sono stimati a circa 0,22 €/Nm^3 se il biogas contiene il 50% di metano, ma si riducono a circa 0.12 €/Nm^3 se il biogas contiene il 70% di metano. Il processo appare quindi molto promettente, soprattutto se si considera che non si è proceduto a un'accurata ottimizzazione del processo stesso ed è ragionevole ipotizzare che ci siano ampi margini di miglioramento delle prestazioni e di riduzione dei consumi energetici e dei costi.

In ogni caso, nello schema di processo proposto i consumi energetici (energia termica) sono ancora elevati, ma indubbiamente significativamente più bassi di quelli relativi a un processo amminico tradizionale (3-4 kJ/kg CO_2 assorbita). Poiché il consumo energetico è, in questo tipo di processi, sostanzialmente proporzionale alla quantità di CO_2 assorbita, il processo proposto potrebbe essere particolarmente conveniente o in associazione ad altri trattamenti che riducono la concentrazione di CO_2 nel biogas senza arrivare alle specifiche richieste per l'immissione in rete, o nei casi in cui il processo di digestione sia ben realizzato e conduca alla produzione di biogas di buona qualità.

Ovviamente, le conclusioni presentate sono relative ai risultati di una valutazione di massima, basata su un limitato numero di prove sperimentali effettuate su scala di laboratorio e orientate all'ottenimento di indicazioni preliminari per lo sviluppo di una nuova tecnologia. Tali conclusioni dovranno pertanto essere validate dai risultati di una sperimentazione più ampia, che preveda prove di assorbimento e rigenerazione in continuo, realizzata anche su impianto pilota.

A tal fine, presso il Centro ENEA della Casaccia è stata effettuata la progettazione di un sistema prototipo da accoppiare all'impianto pilota di DA DMM6000 [rapporto RdS/PAR2013/248]. La portata di progetto dell'impianto è di 100 NL/h di biogas in uscita dal digestore a temperatura ambiente. Lo schema del sistema è riportato in Figura 90. Maggiori informazioni su modalità del processo sviluppato, parametri operativi e logiche di controllo sono contenute nel rapporto tecnico completo.

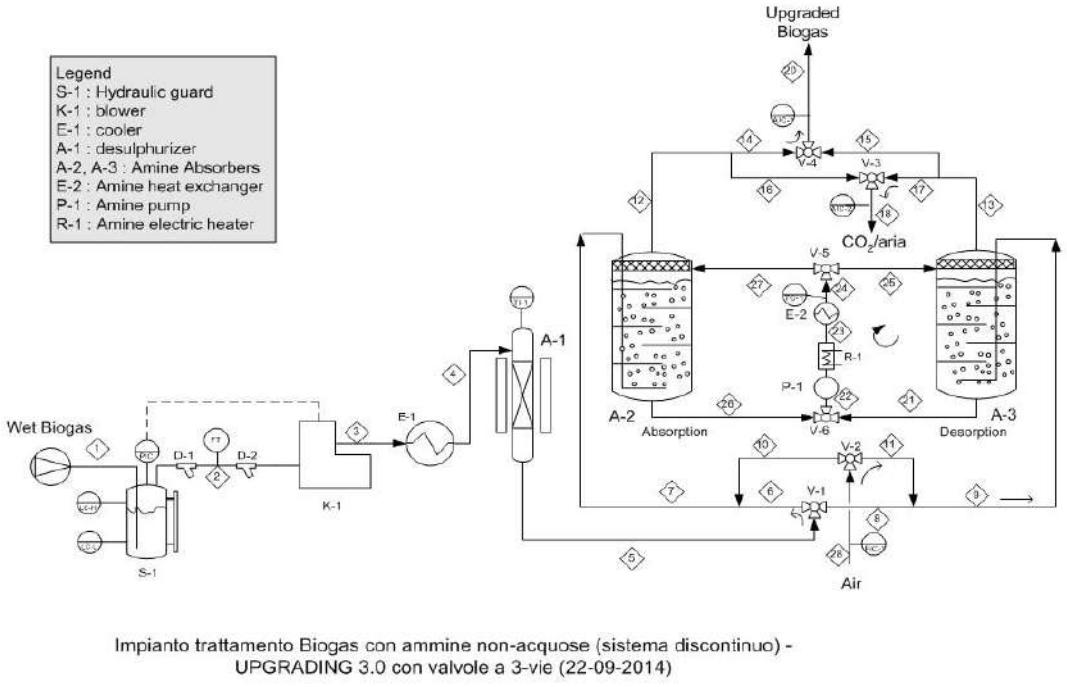


Figura 90. Schema del sistema di upgrading del biogas prodotto dal DMM6000

Sviluppo di un processo di produzione di biometano da biogas mediante formazione di gas idrati

Le attività di ricerca e sviluppo su questo argomento sono state svolte nell'ambito di un accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Farmacia dell'Università di Chieti-Pescara riguardante lo sviluppo di un processo per l'upgrading del biogas basato sulla formazione selettiva di idrati dell'anidride carbonica e/o metano [rapporto RdS/PAR2013/133]. In particolare, si intendeva studiare le potenzialità offerte dalla formazione dei gas idrati per purificare il biogas, con l'obiettivo di sviluppare una tecnologia innovativa basata sui processi di formazione di fasi cristalline, chiamate clatrati Idrati o più semplicemente gas idrati, che hanno la peculiarità di avere una particolare struttura cristallina che presenta delle cavità abbastanza ampie da poter includere una molecola di gas.

Le attività sperimentali previste avevano in primo luogo lo scopo di validare, ampliare ed approfondire i risultati parziali ottenuti nella precedente annualità a seguito della collaborazione tra la società RDPower S.r.l. ed ENEA. Infatti, il Dipartimento di Farmacia dell'Università di Chieti dispone di un'apparecchiatura per lo studio dei gas idrati in grado di eseguire test complementari a quelli effettuati nel corso della precedente annualità. In particolare l'apparecchiatura presenta un volume circa doppio rispetto a quello dei reattori utilizzati da RDPower, e il sistema permette inoltre di eseguire test sia in modalità "pressure drop" che a pressione costante. Per contro,

le apparecchiature di RDPower lavorano solo in "pressure drop", ma permettono l'uso di miscele di gas più complesse create ad hoc e di eseguire test multipli in parallelo ed in tempi minori.

Validazione dei dati ottenuti nel PAR 2012

L'attività è iniziata con la replica, presso l'Università di Chieti-Pescara, dei risultati della miscela CH_4/CO_2 60/40 alla pressione di sperimentazione di 80 bar, con lo stesso profilo di temperatura adottato da RDPower, passando poi alla replica dei dati a 60 bar. I risultati ottenuti mostrano che vi è un ottimo accordo tra i dati raccolti da RDPower nelle attività precedenti e quelli replicati presso l'Università.

Le curve di dissociazione, che forniscono informazioni di natura termodinamica sul sistema, sono replicate perfettamente, e lo stesso si può dire per gli aspetti cinetici, anche se vi è una certa variabilità sulla cinetica di questi sistemi, soprattutto in riferimento ai sotto raffreddamenti necessari ad indurre la formazione di idrato. Il grafico di Figura 91 riporta le curve di dissociazione per la miscela CH_4/CO_2 60/40 alle pressioni di 80, 60 e 30 bar, evidenziando come i dati sperimentali siano in ottimo accordo con il modello teorico.

Non si sono infine osservati sostanziali effetti cinetici relativi alla diversa natura delle apparecchiature, il volume doppio e le superfici intere teflonate dell'apparecchiatura presente nei laboratori dell'Università rispetto a quelle di RDPower non hanno influenzato significativamente il processo.

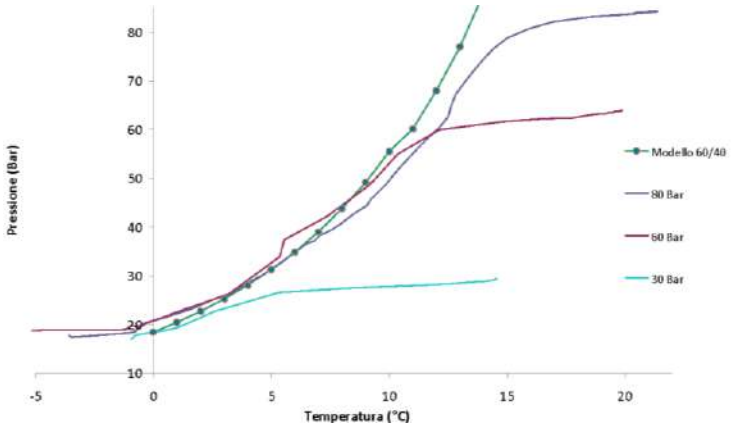


Figura 91. Profili di dissociazione alle pressioni di 80, 60, 30 bar per la miscela CH_4/CO_2 60/40 a confronto con il modello teorico

Effetto dell'H_2S

Sono state avviate le sperimentazioni da parte di RDPower su miscele contenenti H_2S. I primi test sono partiti dalla pressione di 80 bar per avere un riscontro con i dati dell'anno precedente. I risultati preliminari mostrano come la presenza di H_2S non influisce sulla termodinamica del sistema. Infatti, vi è un ottimo accordo con i dati relativi alle miscele senza H_2S.

La Tabella 36 riporta un confronto dei valori di sotto raffreddamento (Sub) tra i vari esperimenti con e senza H_2S, il sotto raffreddamento è stato calcolato individuando la pressione di inizio formazione (P_f) e la temperatura di inizio formazione (T_f), in base alla P_f si calcola la temperatura teorica di formazione da modello matematico (T_{teo}), il sotto raffreddamento (Sub) è calcolato sottraendo alla temperatura teorica la reale temperatura di formazione..

Tabella 36. Confronto dei valori di sottoraffreddamento tra il sistema mix CH_4/CO_2 60/40 senza H_2S e quello con H_2S a 2000 ppm

	Mix CH_4/CO_2 60/40, No H_2S				Mix CH_4/CO_2 60/40, H_2S 2.000 ppm			
	P_f	T_f	T_{teo}	Sub	P_f	T_f	T_{teo}	Sub
1° Formazione	54,9	-2,7	10,4	13,1	59,1	4,3	11,0	6,7
2° Formazione	55,9	0,0	10,6	10,6	60,3	8,2	11,2	3,0
1° Formazione	-	-	-	-	58,1	2,8	10,9	8,1
2° Formazione	-	-	-	-	57,8	4,4	10,8	6,4

Come ci si attendeva dai modelli teorici, è stato confermato che la presenza di H_2S non influenza la termodinamica del sistema. Le curve di dissociazione della miscela CH_4/CO_2 60/40 senza H_2S e quelle con H_2S sono sovrapponibili a

meno di minimi errori strumentali. La presenza di H_2S nel biogas, anche alle elevate concentrazioni di 2.000 ppm, non ha influenza sull'efficienza di separazione del processo, mentre dal confronto sulle cinetiche di formazione si osserva come l'H_2S giochi un ruolo di promotore, abbassando i sotto raffreddamenti necessari ad indurre la formazione (l'entità del sotto raffreddamento, a parità di condizioni, dà un'indicazione di quanto il sistema è inibito o favorito nella formazione di idrati) e rendendo più riproducibile il processo.

Miglioramento di processo

Si è affrontata quindi la progettazione, la sintesi e la caratterizzazione di nuovi tensioattivi potenzialmente promotori della formazione di idrati, che fossero in grado di migliorare le caratteristiche di processo e le rese di separazione. In via preliminare, sono state individuate come nuove strutture generali di possibile interesse quelle aventi una o più delle seguenti caratteristiche fondamentali: (a) una carica elettrica complessiva negativa distribuita sul "gruppo di testa" della porzione anfifila; (b) un controione cationico di varia densità di carica; (c) un anello aromatico nella porzione anfifila; (d) una coda idrocarburica di almeno 8 atomi di carbonio.

Sono stati quindi selezionati e provati i seguenti nuovi tensioattivi:

- Commerciale 1: sodio oleato
- Tensioattivo 1: 2-(4-(alchilossi)fenil)alchilsolfato di sodio
- Tensioattivo 2: 3-(4-(alchilossi)fenossi)alcan-1-solfonato di sodio
- Tensioattivo 3: alcanolamminio p-alchilossibenzensolfonato

I nuovi promotori sono stati provati nelle procedure sperimentali consolidate per verificarne l'eventuale capacità di alleviare le condizioni di formazione di idrati, ed eventualmente le proprietà di separazione del sistema. In particolare, il promotore T3 ha mostrato ottime prestazioni, al punto da suggerire la possibilità di ridurre ulteriormente la pressione di esercizio. Si sono quindi eseguite prove alla pressione di partenza di 25 bar con 150 ppm di promotore T3.

In conclusione, si può affermare che lo sforzo progettuale e di sintesi nella realizzazione di nuovi promotori ha dato risultati soddisfacenti. In particolare, il promotore T3 ha mostrato un eccellente effetto sulla cinetica di formazione, tale da poterne prevedere un ulteriore approfondimento ed eventuale utilizzo in una successiva fase pre-industriale.

Nel frattempo, RDPower ha messo a punto un migliorato e raffinato sistema di controllo e di agitazione interna del sistema, riuscendo ad abbassare notevolmente le pressioni necessarie ad indurre l'inizio della formazione. Dagli 80 bar utilizzati nelle attività precedenti si è arrivati ad operare prima a 60 poi a 40 bar. Un ulteriore abbassamento fino a 20 bar si è ottenuto con l'azione combinata dell'H_2S.

In altri esperimenti si è determinato il contributo sulla separazione derivate dalla dissoluzione della CO_2 in acqua. I risultati ottenuti hanno evidenziato come il contributo dell'acqua sulla separazione sia importate e come si sommi all'effetto dell'idrato. Dai dati riportati in Tabella 37 si può infatti vedere che al diminuire della quantità di acqua disponibile l'efficienza di separazione tende a diminuire leggermente.

Tabella 37. Analisi fase gas prima e dopo formazione di gas idrato per i test con quantità di acqua di 40, 30, 20 mL

	50 mL, 60 bar		40 mL, 60 bar		30 mL, 60 bar		20 mL, 60 bar	
	%CH_4	%CO_2	%CH_4	%CO_2	%CH_4	%CO_2	%CH_4	%CO_2
Start Mix	60	40	60	40	60	40	60	40
Fase Gas	78	22	75	25	72	28	70	30

Ulteriori esperimenti sono stati eseguiti per verificare come la composizione della fase gassosa si modifichi durante la formazione degli idrati. Potendo operare con 3 autoclavi in parallelo sono stati preparati tre esperimenti uguali partendo da 60 bar di pressione iniziale, eseguendo tre campionamenti di gas, uno per autoclave a 40, 30 e 20 bar alla fine. I risultati ottenuti hanno evidenziato come la CO_2 sia preferenzialmente assorbita nelle prima fase del processo di formazione di idrato.

Valutazione preliminare tecnica/economica del processo di upgrading

In base ai risultati ottenuti dall'Università degli Studi di Chieti nel presente anno, che sostanzialmente confermano quelli raccolti da RDPower nel corso del 2013, è stato possibile evidenziare che le variabili impiantistiche influenzano molto poco il comportamento degli idrati delle miscele gassose prese in esame. Su miscele ternarie di

gas ($CH_4/CO_2/H_2S$), è stato possibile dimostrare che per tali sistemi le pressioni di esercizio possono essere notevolmente abbassate (fino a 20 bar) conservando un'ottima ripetibilità del processo. Anche le temperature necessarie alla formazione degli idrati sono risultate molto prossime a quelle di equilibrio teorico del sistema studiato.

Ridurre la pressione di lavoro del processo non è importante solo ai fini dei conti impiantistici ma ancor più importante ai fini della resa dello stesso. Infatti passare da 80 a 40 bar significa anche ridurre la quantità di gas nel reattore della metà, tenendo conto che la pressione di fine formazione si conserva pressoché costante a 20 bar, di conseguenza si raddoppia il rapporto gas arricchito/gas impoverito. Ciò si traduce in un raddoppio dell'efficienza del processo.

E' quindi possibile utilizzare, in un ipotetico processo di separazione su scala industriale, impiantistica ordinaria per via delle pressioni e temperature in gioco piuttosto modeste, che permettono di stimare costi energetici per il funzionamento dell'impianto (compressione gas, raffreddamenti, riscaldamenti) molto meno gravosi di quelli ipotizzati inizialmente alla luce dei primi esperimenti effettuati a pressioni molto più elevate (80 bar).

Sulla base dei risultati sperimentali, le condizioni operative ottimali individuate sono le seguenti: P_{lavoro}=40 bar, $T_{lavoro=}$ da 15 a 1 °C, agitazione efficiente a 3000 rpm, utilizzo di biogas non desolforato, promotori anfifili specifici a basso dosaggio e utilizzo di acqua di rete o di falda.

Partendo da questi elementi è stata sviluppata una progettazione concettuale per un impianto che implementi il processo di upgrading del biogas mediante formazione di gas idrati.

I risultati hanno dimostrato che il fabbisogno energetico elettrico del processo risulterebbe di circa 0,214 kWh/Nm^3 di biogas, mentre quello termico, in termini di potenza frigorifera risulterebbe di 0,487 kWh/Nm^3 di biogas. I fabbisogni energetici, sia elettrico che di potenza frigorifera potrebbero essere ampiamente soddisfatti alimentando un sistema di trigenerazione con il gas impoverito in CH_4 risultante dalla dissociazione della fase idrato.

In conclusione, i risultati ottenuti hanno dimostrato che il processo di upgrading del biogas mediante formazione di gas idrati risulta fattibile e vi sono elementi chiari per cui l'industrializzazione del processo risulterebbe praticabile. La resa di purificazione del processo è soddisfacente e i costi energetici dello stesso possono essere coperti mediate opportuno recupero energetico del gas impoverito risultante dal processo di separazione.

b.3 Ottimizzazione del processo di produzione di biometano a partire da syngas sull'impianto pilota di biometanazione BIOSNG

Nei processi di gassificazione della biomassa il gas prodotto presenta rapporti H_2/CO inferiori a quelli indicati dalla stechiometria della reazione di metanazione (3:1). A seconda della tecnologia di gassificazione adottata e delle condizioni di processo, il gas prodotto dalla gassificazione di biomassa raggiunge al più un rapporto H_2/CO di 2. Per un'ottimale conversione del gas in metano si richiede pertanto un condizionamento della composizione del gas a valori più favorevoli.

La presente linea di ricerca si confronta con questo obiettivo e a tal fine prevede una attività sperimentale rivolta all'aggiustamento della composizione del gas di gassificazione ed una di conversione in metano.

Attività sull'aggiustamento della composizione del syngas attraverso l'uso di sorbenti per la cattura di CO_2

Per l'aggiustamento della composizione del gas di gassificazione, si è considerato il processo "a secco" di simultanea promozione della reazione di *shift* del gas d'acqua (WGS) e rimozione della CO_2 attraverso l'uso di specifici sorbenti. Poiché la miscela di partenza contiene già H_2 e CO_2, e la CO_2 è anche uno dei prodotti della reazione di *shift*, tale processo, sottraendo CO_2 all'equilibrio di reazione, presenta il vantaggio di favorirne lo spostamento verso l'arricchimento della miscela gassosa in H_2.

I sorbenti adatti a svolgere questo ruolo sono diversi. Presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università dell'Aquila (UnivAQ), da diverso tempo si stanno studiando e sviluppando materiali con capacità sorbenti verso la CO_2 e pertanto, a partire dalla scorsa annualità della RdS, l'ENEA ha avviato con lo stesso una collaborazione per la preparazione e selezione di materiali da testare infine su gas reale di gassificazione.

Dando seguito ai risultati conseguiti nella precedente annualità, presso i laboratori UnivAQ, sono stati preparati quantitativi significativi di quei sorbenti sperimentali che in una preliminare attività di screening e caratterizzazione, si sono rivelati i più promettenti per la cattura di CO_2, ovvero idrotalciti del tipo Mg/Al, Ca/Al e Mg/Ca/Al [rapporto RdS/PAR2013/244], la cui composizione è riportata di seguito in Tabella 38.

Tabella 38. Sorbenti di sintesi per la cattura della CO_2 dal syngas

Sigla campione	Composizione
HT1	A base di Mg-Al
HT2	A base di Ca-Al
HT3	A base Mg-Ca-Al
HT1K	HT1 calcinato a 450°C + K_2CO_3
HT2K	HT2 calcinato a 700°C + K_2CO_3
HT3K	HT3 calcinato a 700°C + K_2CO_3
HT3K	HT3 essiccato a 120°C + K_2CO_3

Tutti i campioni, al termine della procedura di sintesi sono stati essiccati a 120 °C. Di questi, aliquote di circa 50 g di ciascun materiale, tal quale e attivati con K_2CO_3 (20%$_p$), sono stati forniti al Centro ENEA della Trisaia per le relative prove sperimentali con miscele CO/H_2O.

Le prove in oggetto erano finalizzate ad individuare i sorbenti con le prestazioni migliori. In particolare, per tener conto dell'ottimizzazione del processo complessivo anche sul piano dell'efficienza energetica, sono state condotte prove di WGS e simultanea rimozione CO_2 a bassa ed alta temperatura, ovvero 400 e 600 °C . A valle delle prove di screening, quantitativi di ciascun campione post-test sono stati inviati all'Università dell'Aquila per la loro caratterizzazione chimica e morfologica, pre e post test, attraverso analisi BET-BJH, XRD, FTIR e TG-DTA.

Sulla base dei test condotti sulla miscela CO/H_2O, il materiale più promettente per l'impiego a 400 °C è stato il sorbente idrotalcitico (Mg/Al) Pural MG70 attivato con K_2CO_3, mentre per impieghi alla temperatura di 600 °C, i più promettenti sono risultati due materiali di sintesi contenenti anche calcio.

Dagli andamenti della composizione del gas all'uscita dal reattore, si osserva come a fronte di una composizione di alimentazione contenente CO/H_2O, i tre sorbenti, alle rispettive T di esercizio, siano in grado di agire sulla reazione di WGS sequestrandone la CO_2.

Sui materiali recuperati a fine prova, le analisi di caratterizzazione post-test evidenziano la formazioni di fasi coerenti con i processi subiti dai vari campioni: in particolare si nota la formazione dei rispettivi carbonati, che risultano dunque essere le principali fasi cui attribuire l'auspicato effetto di "enhancement" della reazione.

Parallelamente alla preparazione dei sorbenti sperimentali, UnivAQ ha progettato un impianto di scala laboratorio per la sperimentazione della cattura di CO_2 da corrente di processo in pressione [rapporto RdS/PAR2013/245]. L'impianto consta di sistema di *mass flow meters* per l'alimentazione gassosa (N_2, CO_2, …) e può operare sia con gas secco sia con gas umido. Uno schema di sintesi dell'impianto è riportato in Figura 92.

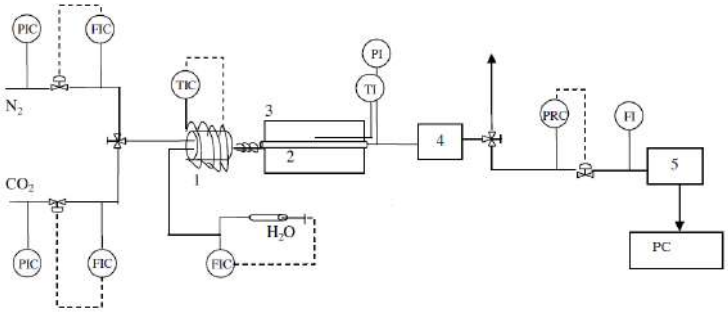


Figura 92 . Flowsheet dell'impianto di laboratorio (1. evaporatore, 2. microreattore, 3. forno, 4. condensatore, 5. analizzatore)

Attività sulla conversione catalitica di syngas in biometano

La reazione di conversione del syngas in CH_4 avviene, come è noto, attraverso l'uso di catalizzatori a base di nichel. che sono sensibili alla composizione del gas. In ragione dello specifico contenuto di vari componenti gassosi possono, più o meno velocemente, ricoprirsi di carbonio con conseguente perdita dell'attività catalitica. Nella formulazione dei catalizzatori commerciali, tipicamente il Ni è disperso in una matrice di allumina in cui, secondo specifiche formulazioni dei produttori, sono inclusi anche componenti secondari che aiutano a garantire le prestazioni del catalizzatore e la sua resistenza a cause di disattivazione.

Tra le diverse cause di disattivazione, una di particolare rilevanza è quella dovuta alla formazione di depositi di carbonio sui siti attivi. La tendenza dipende sia dalla composizione del gas che si intende convertire, in termini di contenuto di CO, CO_2, H_2, H_2O, CH_4, idrocarburi leggeri, ma anche da fattori correlati alle caratteristiche del

catalizzatore. Circa queste ultime, è in effetti possibile sfavorire la formazione dei depositi di carbonio variando la natura della matrice del bulk del catalizzatore.

L'ENEA in collaborazione con Il laboratorio di catalisi del Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari", dell'Università di Bologna (UniBO) ha avviato dalla scorsa annualità un'attività finalizzata allo sviluppo di catalizzatori di metanazione, prestando particolare attenzione alla disattivazione da formazione di depositi carboniosi.

Un fattore la cui variazione può portare importanti miglioramenti rispetto alla riduzione di formazione di depositi di carbonio risulta il rapporto acido:base della matrice.

Sulla base di risultati pregressi e di quelli conseguiti nel corso della sperimentazione dello scorso anno, UniBO ha quindi preparato nuovi catalizzatori contenenti Ni su matrice Mg/Al [rapporto RdS/PAR2013/246].

Nello specifico sono stati preparati tre nuovi campioni caratterizzati da stesso contenuto in Ni (27,5%$_p$) e rapporto Mg/Al variabile, in modo da poter verificare l'effetto dell'abbondanza relativa dei siti basici (MgO) rispetto ai siti acidi presenti nello spinello ($MgAl_2O_4$) sulle prestazioni dei materiali, in termini di attività catalitica e di stabilità.

Sono stati preparati i catalizzatori $Ni_{24,3}Mg_{46,7}Al_{29}$ (M^{2+}/M^{3+} = 2,5), $Ni_{24}Mg_{51}Al_{25}$ (M^{2+}/M^{3+} = 3) e $Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$ (M^{2+}/M^{3+} = 4), corrispondenti a rapporti molari metallo bivalente M^{2+} (Ni e Mg) e metallo trivalente M^{3+} (Al) nell'intervallo 2,5÷4. Questi materiali sono quindi stati caratterizzati in test di metanazione utilizzando gas di sintesi rappresentativi di correnti gassose ottenibili da gas di composizioni variabile [rapporto RdS/PAR2013/247].

Nella scelta delle condizioni di prova, particolare attenzione è stata dedicata allo studio dell'effetto dei diversi rapporti H/C e O/C del gas di alimentazione (H_2 + H_2O, CO e CO_2). Nelle Tabelle 39 e 40 sono riportati i risultati di due set di test condotti al variare della composizione del gas di alimentazione.

Tabella 39. Condizioni operative di test con gas di composizione variabile a valle di WGS

	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4
T_{oven} [°C]	300			
GHSV [h^{-1}]	20000			
H_2/CO	4,1			
Composizione miscela entrante [%v/v]				
H_2	32,88	32,56	32,58	26,69
CO	8,03	8,12	8,05	6,67
CH_4	3,98	4,02	3,99	3,31
CO_2	28,14	34,22	24,14	34,04
C_2H_4	1,07	1,07	1,07	0,87
H_2O (v)	25,90	20,01	30,17	28.47

Il primo set di test si riferisce ad un gas rappresentativo di quello ottenuto dalla gassificazione di biomassa con O_2/vapore, a valle di un aggiustamento della composizione H_2/CO dopo reazione di WGS, mentre il secondo si riferisce invece ad un gas con un rapporto H_2/CO ed un contenuto di H_2O più alti. Questo secondo set di composizioni è stato preso in esame poiché le prove condotte sui gas del primo set e relative analisi termodinamiche hanno rivelato una propensione dei gas a depositare carbonio.

Dallo studio termodinamico si osserva che il gas del "Test 3", caratterizzato dal più alto contenuto di H_2O e dal più basso contenuto di CO_2, è quello che mostra la minore tendenza a formare carbonio, pertanto le composizioni dei gas del secondo set di test (Tabella 40) sono state selezionate sulla base di questa composizione.

Le prove di metanazione condotte su pellets 14-20 mesh dei tre catalizzatori preattivati, in reattore di scala laboratorio a 300 °C e a pressione atmosferica, hanno evidenziato che, dei tre campioni preparati, il catalizzatore con le prestazioni migliori verso la conversione in metano è il $Ni_{23,7}Mg_{56,3}Al_{20}$, ovvero quello con il maggior rapporto M^{2+}/M^{3+} (4:1). Questo catalizzatore è risultato attivo e stabile in tutte le condizioni di reazione esaminate.

Tabella 40. Condizioni operative di test con gas ad alto rapporto H_2/CO e H_2O

	TEST 5 STD	TEST 6 ⇧ %H_2O	TEST 7 ⇩ %CO_2	TEST 8 ⇧ FLUSSO H_2O	TEST 9 ⇩ FLUSSO CO_2
T_{oven} [°C]	300				
GHSV [h^{-1}]	20000	20000	20000	18392	21170
H_2/CO	6,8				
Composizione miscela entrante [%v/v]					
H_2	33,81	38,33	30,55	36,82	31,42
CO	5,08	5,75	4,49	5,56	4,79
CH_4	4,04	4,50	3,69	4,40	3,79
CO_2	20,98	20,92	24,62	22,84	25,85
C_2H_4	0,67	0,75	0,60	0,73	0,63
H_2O(v)	35,42	29,94	35,42	29,81	33,61

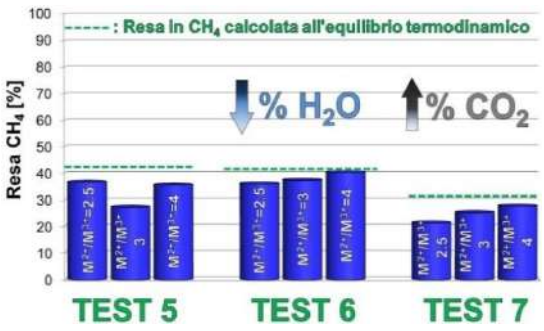


Figura 94a. Resa in metano ottenuta con i campioni a diverso rapporto M^{2+}/M^{3+} nelle prove di metanazione (TEST 5, 6, 7) e confronto con i valori calcolati all'equilibrio termodinamico

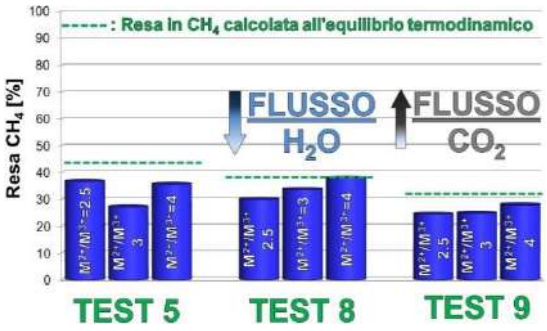


Figura 94b. Resa in metano ottenuta con i campioni a diverso rapporto M2+/M3+ nelle prove di metanazione (TEST 5, 8, 9) e confronto con i valori calcolati all'equilibrio termodinamico

Il campione con il rapporto M^{2+}/M^{3+} più basso, pur manifestando un'attività inizialmente confrontabile, si rivela meno stabile al crescere del tempo di reazione. La disattivazione è particolarmente visibile dopo i test a minor contenuto di vapore, in accordo con l'ipotesi che la disattivazione sia dovuta alla formazione di carbone.

La differenza in funzione del rapporto M^{2+}/M^{3+} può essere attribuita alla maggiore basicità del sistema con M^{2+}/M^{3+} pari a 4 che aumenta la densità elettronica del NiO e inibisce la formazione di carbone sulla superficie del supporto. Per quanto riguarda il campione con rapporto M^{2+}/M^{3+} intermedio, questo si dimostra poco attivo nelle prime prove, probabilmente a causa di una parziale ri-ossidazione del Ni nella fase di start up dell'impianto, e tuttavia si mostra più stabile del campione con minore rapporto M^{2+}/M^{3+}.

La formazione di depositi di carbonio in dipendenza del rapporto M^{2+}/M^{3+} è stata supportata dalle analisi di caratterizzazione condotte sui campioni scaricati al termine delle prove catalitiche. In particolare i campioni sono stati analizzati con analisi termogravimetrica (TGA), spettroscopia Raman e microscopia SEM-EDX.

I dati più significativi sono stati ottenuti con la spettroscopia Raman accoppiata a microscopia ottica. Per ogni campione sono stati acquisiti tre spettri in tre zone differenti. Come è possibile osservare dalla Figura 95, il campione con il minor rapporto M^{2+}/M^{3+} è quello che mostra le bande caratteristiche del carbone più intense e definite. Sono infatti ben evidenti la banda a circa 1.600 cm^{-1}, determinata dalla presenza di carbone di tipo grafitico (o ordinato), e la banda a circa 1.340 cm^{-1} relativa ad un tipo di carbone più amorfo (o disordinato). Tali bande sono visibili in tutte e tre le zone di campione investigate, ad indicare una significativa presenza di carbone in tutto il campione.

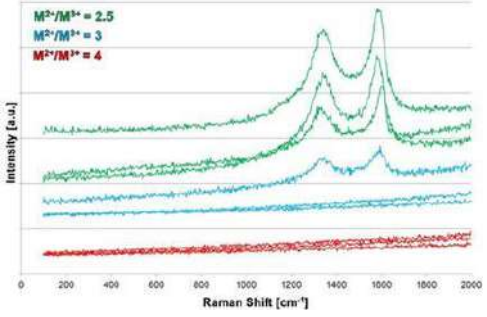


Figura 95. Spettri Raman ottenuti su 3 zone di campioni Ni/Mg/Al

Nel campione con rapporto intermedio M^{2+}/M^{3+}=3, l'analisi mostra che solamente uno degli spettri presenta le

bande appena descritte, inoltre la loro intensità risulta decisamente inferiore rispetto a quella delle bande caratterizzanti gli spettri del campione M^{2+}/M^{3+}=2,5 indicative di una minore tendenza alla formazione di carbone. Per quanto riguarda invece il campione con il rapporto M^{2+}/M^{3+}= 4, tutti gli spettri registrati sulle tre zone non presentano le bande caratteristiche del carbone e dimostrano che elevati rapporti Mg/Al inibiscono la formazione di carbone.

In previsione dell'uso del catalizzatore di nuova formulazione in un processo di metanazione su gas reale, parallelamente alle attività di sviluppo del catalizzatore condotta dall'Università di Bologna, nella presente annualità è stata avviata presso FN SpA un'attività per lo sviluppo di una procedura di preparazione di pellet con caratteristiche adeguate all'utilizzo nel reattore in scala pilota dell'impianto BioSNG del Centro ENEA della Trisaia.

A tal fine l'Università di Bologna ha preparato e fornito ad FN SpA aliquote del materiale precursore. Sulla base del quantitativo e delle caratteristiche del materiale fornito, FN ha individuato una serie di leganti organici con i quali sono state effettuate alcune prove preliminari di compatibilità con il materiale simulante e di estrusione [rapporto RdS/PAR2013/241]. I leganti sono stati scelti tra quelli tipicamente utilizzati nei processi di estrusione (poliolefine) e quelli utilizzati nei processi di pressatura (stearina, olio paraffinico, polietilenglicole, alcol polivinilico e amido). Tra le due tipologie, i risultati migliori si sono ottenuti utilizzando PEG, PVA e amido.

Nella Figura 96 sono presentate alcune delle fasi dell'operazione di formatura di pellet relativa all'impiego di amido.

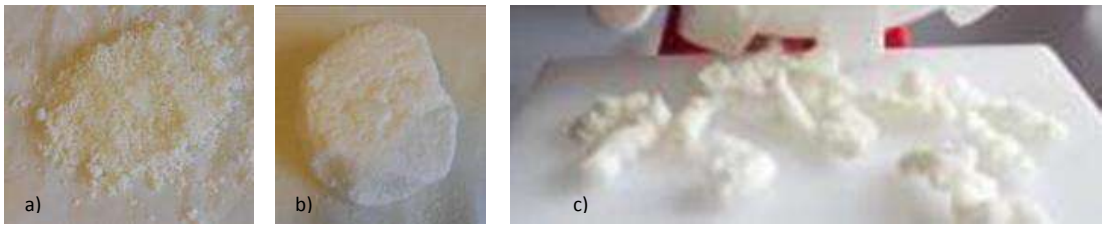


Figura 96. Alcune fasi della preparazione di pellet a partire dal materiale Mg/Al non attivo: a) granulazione della polvere; b) massa morbida da estrudere; c) pellet da estrusione di mescola con amido

In accordo con la pianificazione delle attività previste sulla produzione di biometano, sono stati condotti test preliminari di conversione gas in metano utilizzando l'impianto pilota Bio-SNG del Centro ENEA della Trisaia (Figura 97).



Figura 97. Impianto pilota BioSNG

Le prove sono state condotte utilizzando un catalizzatore commerciale in pellet (BASF G1-85 T5x5) contenente nichel e condizioni operative a valori di temperatura nell'intervallo 300-400 °C e pressione 20-30 bar. Queste prove sono state finalizzate all'acquisizione di informazioni sul sistema e sulle prestazioni del catalizzatore commerciale, propedeutica ad una successiva sperimentazione con il catalizzatore di sintesi di nuova formulazione.

Nello specifico, sono state condotte due tipologie di prove: con gas binario secco "H_2 + CO" e con gas umido multicomponente di composizione riconducibile a quella ottenibile dal processo reale di gassificazione biomassa O_2/vapore in reattore a letto fluidizzato con ricircolo interno (ICBFB).

In tutti i test condotti con miscela anidra "H_2 + CO" l'analisi cromatografica ha rivelato la formazione di metano, ma al diminuire del rapporto H_2/CO, accanto al CH_4 si è osservato anche formazione di CO_2 e di depositi di carbonio sul catalizzatore. Tali formazioni si possono spiegare attraverso la reazione di disproporzione del CO. Nel caso della prova condotta con il gas con il rapporto H_2/CO più basso l'accumulo di carbonio è stato tale da richiedere la sospensione della prova.

Per quel che riguarda invece i test condotti con miscela umida multicomponente, i risultati ottenuti hanno evidenziato che è possibile ottenere metano senza significativi problemi di esercizio sia con il gas ad alto rapporto H_2/CO (6,5), sia con il gas con basso rapporto (1,2). I risultati ottenuti in questo secondo caso in effetti risultano essere di particolare rilevanza, poiché a dispetto del rapporto H_2/CO non ottimale rispetto alla reazione di formazione del metano (3:1) e diversamente dal test analogo condotto con miscela binaria, si è riscontrata una produzione significativa di CH_4. Questo risultato in effetti si spiega tenendo conto del contenuto di H_2O nel gas alimentato (32% v). Grazie alla sua presenza, nelle condizioni di reazione adottate, accanto alla reazione di metanazione, si è potuta instaurare anche la reazione di *Water Gas Shift* che, arricchendo in H_2 il gas alimentato, ha favorito la formazione del CH_4 e ostacolato la formazione di depositi di carbonio della disproporzione del CO.

Anche sui campioni recuperati da questo secondo set di prove si è osservata la presenza di carbonio sui pellet recuperati a fine test, sebbene il campione relativo al test condotto con alto rapporto H_2/CO appare più pulito di quello recuperato dal test su gas con H_2/CO basso. Per una caratterizzazione più puntuale ed oggettiva, i materiali recuperati a fine prova sono stati sottoposti a caratterizzazioni analitiche al fine di stabilire lo stato di integrità del catalizzatore a valle delle prove condotte.

Nell'insieme, i risultati ottenuti in questa campagna di prove preliminari hanno fornito conferme sulla possibilità di produrre metano a partire da un gas di gassificazione biomassa. Per poter decidere quale dei due gas testati possa essere preferibile convertire, gas ottimizzato nella composizione rispetto al rapporto H_2/CO piuttosto che gas tal quale con basso rapporto, saranno utili i risultati raccolti da una successiva campagna sperimentale di lunga durata.

c. Sviluppo di sistemi di produzione dell'energia elettrica e cogenerativi e riduzione dell'impatto ambientale

Le attività svolte nell'ambito del PAR 2013 con riferimento a questo obiettivo sono state indirizzate:

- allo studio di caldaie a sali fusi ad alta temperatura (> 450 °C) alimentate con biomassa lignocellulosica per impianti di produzione di energia elettrica e co/trigenerazione di piccola-media taglia basati su cicli termici con vapore d'acqua o con nuovi fluidi operanti ad un livello termico superiore a quelli attualmente in uso;
- alla rimozione del particolato fine e degli inquinanti organici dalle emissioni gassose della combustione delle biomasse solide.

c.1 Caratterizzazione termo-fluidodinamica di miscele di sali fusi in caldaie innovative e sviluppo di un modello per la valutazione energetica ed economica dei sistemi cogenerativi

I nitrati fusi (miscele di nitrati alcalini ed alcalino terrosi) possono essere vantaggiosamente utilizzati come fluido di trasporto termico intermedio fra una caldaia a biomasse e un fluido per un ciclo Rankine organico.

Nel corso della precedente annualità della RdS, sono state prese in considerazione possibili miscele di questo tipo, almeno in linea di principio utilizzabili in caldaie a sali fusi ad alta temperatura (> 450 °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 una adeguata efficienza termica della caldaia. Oltre al "solar salt", cioè la miscela di nitrati alcalini ($NaNO_3$/KNO_3 60/40 % in peso) più largamente utilizzata negli impianti solari, altre tre formulazioni sono state considerate come potenzialmente interessanti: una miscela ternaria contenente calcio nitrato ($Ca(NO_3)_2$/$NaNO_3$/KNO_3 42,2/15,3/42,5% in peso), una con nitrito di sodio (prodotto commerciale denominato HITECH© salt, $NaNO_3$/KNO_3/$NaNO_2$ 7:53:40% in peso), ed una con nitrato di litio ($NaNO_3$/KNO_3/$LiNO_3$ 18/52/30% in peso).

Data il basso costo, il basso punto di inizio solidificazione e la relativa facile reperibilità, la miscela ternaria ($Ca(NO_3)_2$/$NaNO_3$/KNO_3 42,2:15,3:42,5%p) si può ritenere molto promettente per questo scopo, sia per l'utilizzo come fluido di trasporto termico che di accumulo. Basandosi sui dati presenti nella letteratura scientifica, e verificati e completati nell'ambito della precedente annualità della RdS, due punti sono sicuramente da chiarire meglio riguardo alle miscele contenenti nitrato di calcio: l'effettiva temperatura limite superiore di utilizzo e la viscosità vicino al punto di congelamento.

Un'apposita campagna sperimentale è stata effettuata per verificare questi punti: dai dati ottenuti risulta

formazione evidente di ossido di calcio sopra i 420 °C e, inoltre, la viscosità vicino al punto di inizio solidificazione si innalza fino a valori di varie centinaia di centipoise (cP), e questo comportamento può sicuramente rendere problematico l'utilizzo di tale miscela come fluido termico di captazione da movimentare (HTF, Heat Thermal Fluid) [rapporto RdS/PAR2013/240].

Mentre il limite dovuto all'instabilità termica sembra realisticamente non superabile, si può invece cercare di migliorare le caratteristiche riguardo alla viscosità aggiungendo alla miscela ternaria un quarto componente: le uniche alternative realistiche sono nitrito di sodio e nitrato di litio. L'aggiunta di uno di questi sali dovrebbe, in linea di principio, migliorare i valori di viscosità vicino al punto di congelamento mantenendo (o migliorando) un basso punto di inizio solidificazione.

L'addizione di nitrito di sodio ad una soluzione di sali fusi contenenti nitrato di calcio risulta in una rapida ossidazione del nitrito a nitrato, dovuta presumibilmente alla grande instabilità in presenza di ossigeno del nitrito di calcio.

Come detto precedentemente, le proprietà riguardo la viscosità dinamica vicino al punto di congelamento del ternario contenente nitrato di calcio possono potenzialmente essere migliorate addizionando nitrato di litio. Chiaramente, visto l'alto costo di questo componente, l'aggiunta dovrà essere limitata entro una certa soglia, altrimenti sarebbe direttamente più conveniente utilizzare la miscela (riportata come eutettico) contenente nitrati di Na, K ed Li (e non di Ca).

Quattro diverse miscele sono state considerate per le misure di viscosità: il ternario con il calcio, da qui in poi indicato come Q0, e tre miscele quaternarie, addizionate con nitrato di litio, in modo da ottenere, rispettivamente, una percentuale finale di $LiNO_3$ di 9, 17, 23% (in peso), e lasciando invariate le percentuali relative dei nitrati di Ca/K/Na. I quaternari verranno da qui in poi indicati come Q9, Q17, Q23.

Preliminarmente, è stato necessario verificare i punti di inizio congelamento (*liquidus point*) delle miscele in questione. Si è dovuto ripetere due volte il ciclo di riscaldamento/raffreddamento per assicurarsi che l'acqua assorbita da queste miscele, che presentano un comportamento significativamente igroscopico se esposte all'aria, venisse completamente rimossa. Il valore ottenuto, circa 125 °C, è inferiore a quello riportato in letteratura, forse perché il processo di solidificazione è relativamente lento. Conservativamente, un valore di 150 °C è stato considerato come limite inferiore per le prove di viscosità.

Riguardo le miscele quaternarie, esse presentano un basso calore latente di solidificazione, anche poco rilevabile vista la presumibile lentezza del processo di cambiamento di fase, ed è quindi difficile una precisa identificazione del punto di inizio congelamento per via calorimetrica, per questo motivi i valori riportati sono da considerarsi come approssimati (comunque congruenti con quanto riportato nella letteratura scientifica) ma, in ogni caso, sono stati utilizzati per determinare le temperature minime alle quali effettuare le prove di viscosità.

La Tabella 41 riporta i punti di inizio solidificazione per la miscela ternaria e le tre quaternarie, e la rispettiva temperatura più bassa considerata per le prove di viscosità.

Tabella 41. Punto di inizio congelamento stimato e temperatura minima utilizzata per le prove di viscosità dinamica per la miscela ternaria e le tre quaternarie

Miscela	T liquidus (°C)	Minima T per viscosità (°C)
Q0	125	150
Q9	120	135
Q17	111	120
Q23	77	110

E' stato analizzato l'andamento della viscosità in funzione della temperatura per la miscela ternaria e le miscele quaternarie. I risultati ottenuti possono essere descritti e riassunti come segue:

- L'effetto dell'aggiunta di nitrato di litio al ternario con il calcio produce un abbassamento nei valori di viscosità tanto più evidente quanto la temperatura è più bassa. In ogni caso i valori misurati risultano sempre maggiori (a tutte le temperature) rispetto a quelli del "solar salt", la miscela binaria ($NaNO_3$/KNO_3 60:40 in peso) largamente usata negli impianti solari a concentrazione come fluido di trasporto termico e, soprattutto, di accumulo, come riferimento per confrontare i dati ottenuti con quelli di sistemi già presenti sul mercato.
- Anche aggiungendo nitrato di litio, la viscosità dinamica per temperature inferiori a circa 160 °C risulta sempre elevata e dell'ordine di almeno un centinaio di cP.

- Nel passaggio da Q17 a Q23 l'unico effetto sulla viscosità si nota a temperature inferiori a 135 °C, e non sembra comunque particolarmente significativo.

Come conclusione si può affermare che la presenza di nitrato di calcio in una miscela di nitrati alcalini produce effetti negativi sulla soglia di stabilità termica, e produce un effetto negativo preponderante sull'aumento della viscosità per temperature inferiori a 160 °C; quest'ultimo può essere solo parzialmente compensato dall'aggiunta ad una miscela ternaria contenente calcio di litio nitrato. La diminuzione del punto di congelamento aggiungendo nitrato di litio rappresenta comunque un risultato interessante per un possibile utilizzo delle miscele quaternarie come mezzi di accumulo (HSM, Heat Storage Material).

Per avere un quadro più chiaro sui vantaggi e svantaggi presentati dalle miscele oggetto dello studio, è stata infine effettuata una stima di massima sui costi basata su valutazioni attuali realistiche. La Figura 98 riporta il costo relativo stimato di varie miscele, prendendo come riferimento unitario quello dell'olio diatermico.

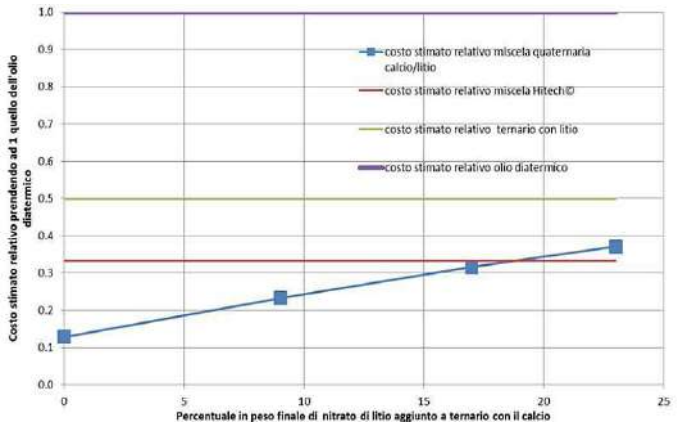


Figura 98. Costo relativo stimato, prendendo ad 1 il costo dell'olio diatermico, per varie miscele ternarie e quaternarie (HITECH® è il nome commerciale del ternario contenente nitrito di sodio)

Si può notare che il ternario con il calcio è presumibilmente il materiale meno costoso. L'aggiunta di litio nitrato rende il costo della miscela più o meno comparabile a quello dell'"HITECH® salt", ma quest'ultimo presenta caratteristiche nettamente migliori rispetto alla viscosità e al punto di congelamento ed una stabilità termica praticamente comparabile.

Conclusioni

Lo scopo delle attività descritte era quello di completare le informazioni relative all'utilizzo di miscele ternarie e quaternarie di nitrati e nitriti, potenzialmente adatte per essere utilizzate come HTF e/o HSM come fluido termico intermedio per impianti ORC, dove i nitrati di sodio e potassio sono sempre presenti e, a seconda del caso, vengono addizionate quantità di litio nitrato, calcio nitrato (o entrambi) o sodio nitrito, in maniera da ottenere miscele finali che siano le più bassofondenti possibili.

Date le temperature massime e minime generalmente presenti per i fluidi organici comunemente utilizzati per i cicli ORC (es. ciclopentano, pentano, toluene), i sali fusi utilizzati dovrebbero presentare un punto di congelamento il più basso possibile e, come limite superiore di stabilità termica, 400 °C dovrebbero essere sufficienti.

Riguardo al punto di inizio solidificazione, si va da un valore di 130-140 °C per i ternari contenenti nitrito di sodio o nitrato calcio, ai circa 120 °C per il ternario con nitrato di litio fino ad ottenere temperature di congelamento per quaternari contenenti nitrati di calcio e di litio anche inferiori ai 100 °C. è interessante notare che per queste ultime miscele si può stimare un costo non superiore a quello del ternario con il nitrito di sodio.

Riguardo il limite superiore di stabilità termica, c'era incertezza nella letteratura scientifica riguardo alle miscele contenenti calcio nitrato; dai risultati riportati in questa relazione si può concludere che 400-425 °C (sotto 1 bar di aria) rappresentano un limite superiore di temperatura conservativo e ragionevole. Gli altri ternari utilizzabili (con litio nitrato o sodio nitrito) sono stabili fino da 430 °C circa in su, a seconda dell'additivante e del tipo di gas con il quale sono a contatto.

Le miscele contenenti calcio nitrato presentano il problema di una viscosità dinamica che sotto i 160 °C risulta di

un ordine di grandezza circa maggiore rispetto ai ternari dove $Ca(NO_3)_2$ non è presente. Comunque, il relativo basso costo ed il fatto che le altre proprietà chimico/fisiche sono comparabili (o anche migliori considerando il punto di congelamento) a quelle delle altre miscele di nitrati/nitrati, rende l'utilizzo di questi fluidi potenzialmente molto interessante, specialmente come sistemi di accumulo termico a calore sensibile.

Corrosione di acciai in miscele ternarie di nitrati fusi

Presso i laboratori dell'ENEA Casaccia è stata eseguita una campagna di prove di corrosione in condizioni statiche di provini di due leghe, un acciaio austenitico della serie AISI 300 e un acciaio martensitico della serie AISI 400, esposti per 2.000 h ad una miscela ternaria di nitrati di sodio, potassio e litio alla temperatura costante di 550 °C, allo scopo di verificare il comportamento dei due acciai a contatto con un mezzo di accumulo termico quale la miscela ternaria di sali fusi, al fine di valutarne la compatibilità per la realizzazione di un serbatoio per sali fusi [rapporto RdS/PAR2013/249].

Le prove sperimentali di corrosione in condizioni isoterme sono state eseguite mediante l'immersione di provini dei due acciai lucidati in crogioli di acciaio inossidabile contenenti la miscela di sali nitrati di sodio e potassio e litio (Figura 99). Il processo ossidativo è stato osservato dopo 2.000 h per entrambi gli acciai esposti ai sali alla temperatura di 550 °C. Alla fine del tempo di immersione, i campioni sono stati estratti, puliti e pesati.



Figura 99. Impianto utilizzato per le prove di corrosione statiche sui due acciai in una miscela ternaria di nitrati fusi a 550 °C

Il processo di ossidazione è macroscopicamente osservato misurando la variazione del peso dei campioni di ogni acciaio, il SEM è stato utilizzato per caratterizzare la morfologia della superficie della strato di ossido che si è formato sulla superficie dei due acciai e la microanalisi EDS per determinare la composizione elementare all'interno della scaglia di ossido e della lega. Lo spessore dello strato di ossido è stato misurato a partire dall'interfaccia ossido/liquido, fino al bulk della lega in cui la concentrazione di ferro corrisponde a quella iniziale della lega. Lo strumento utilizzato è un SEM (FEI, Inspect S modello Genesis) dotato di una sonda EDAX.

Sono stati sottoposti ad analisi tre provini di acciaio AISI 430 saldati e tre provini di AISI 316 Ti saldati. Sia il primo che il secondo acciaio, dopo un tempo di ossidazione di 2.000 h a 550 °C, sembrano avere un buon comportamento a contatto con una miscela ternaria di sali fusi. Non sono presenti né fenomeni di sfogliatura superficiale e distacco della scaglia, né penetrazioni transgranulari dell'ossido all'interfaccia con l'acciaio, e sono quindi assenti fenomeni di ossidazione interna. Lo strato di ossido formatosi durante il tempo di ossidazione è uniforme sulla superficie di entrambi i campioni di acciaio, anche in prossimità delle zone dove è presente la saldatura.

L'AISI 316 Ti saldato presenta un maggior incremento di peso del campione rispetto all'AISI 430 saldato, ed una minore fragilità dello strato di ossido che si forma durante il processo ossidativo, e sembra avere quindi un buon comportamento in miscela ternaria di sali fusi, risultando idoneo alla realizzazione di un serbatoio per sali fusi in cui la temperatura operativa è intorno ai 550 °C.

Strumenti progettuali per scambiatori fumi-sali fusi operanti in differenti condizioni termofluidodinamiche

Nella precedente annualità della RdS sono state affrontate le problematiche legate allo sviluppo di un nuovo tipo di impianto integrato costituito da una caldaia a sali fusi alimentata con biomassa legnosa. Una volta individuate le caratteristiche e la taglia dell'impianto integrato preso come riferimento, si è completato lo studio individuando due architetture funzionali di sicuro interesse industriale e determinando per ciascuna di esse le geometrie caratteristiche e le superfici di scambio termico. In particolare, sono stati analizzati gli aspetti funzionali legati a due particolari configurazioni di scambiatore, denominate "a tubi di sali" e a "tubi di fumo", evidenziandone le principali criticità.

Le attività svolte ell'ambito del PAR 2013, oggetto di un accordo di collaborazione fra ENEA ed Università di Roma Tre, hanno riguardato il progetto dello scambiatore di calore fumi-sali fusi in due configurazioni, una a tubi di fumo per gli impianti di piccola taglia (1 MWt), l'altra a tubi di sale per taglie superiori (5 MWt) [rapporto RdS/PAR2013/134]. A causa della peculiarità delle condizioni di scambio termico che si verificano nella soluzione a

tubi di fumo, si è reso necessario l'approfondimento dello studio del comportamento termofluidodinamico lato sali, in cui lo scambio termico si realizza in regime di convezione naturale.

La possibilità di utilizzare per il riscaldamento del sale fuso i moti convettivi naturali è interessante. Questo si realizza nell'architettura a tubi di fumo disponendo il fascio tubiero in verticale. Mantenendo i flussi in controcorrente, la corrente salina sarà alimentata dal basso, dove saranno prelevati i fumi freddi. Un effetto utile di questa disposizione è la naturale propensione dei sali a stratificarsi secondo densità decrescenti, favorendo il moto autonomo dei sali fusi più caldi verso la zona più calda dello scambiatore.

La modellistica degli scambi convettivi naturali è complessa e molto ramificata, come complessa risulta l'analisi CFD del fenomeno. In tale ottica, si è effettuata l'analisi critica degli strumenti progettuali da impiegare nel dimensionamento degli scambiatori fumi-sali. In particolare, si è proceduto ad una valutazione del coefficiente di scambio termico globale, in grado di rappresentare il comportamento dei sali fusi nell'assetto di scambiatore a tubi di fumo con flussi in controcorrente in verticale. Dal punto di vista del metodo, l'analisi è stata articolata in diverse fasi: la ricognizione preliminare sullo stato dell'arte, la scelta di un modello di scambio termico convettivo fra quelli proposti in letteratura, la modellazione in ambiente 3-D CFD di un elemento di scambiatore a tubi di fumo.

Sulla base delle simulazioni effettuate, si è caratterizzato il comportamento dei sali per quanto riguarda il coefficiente di scambio termico e si è proceduto all'affinamento della progettazione dello scambiatore a tubi di fumo, individuando la superficie di scambio termico e definendo l'assetto costruttivo. In forza delle attività svolte, sono state inoltre confermate le considerazioni relative all'assetto a tubi di sali, specialmente per quanto concerne l'opportunità di ricorrere alla soluzione mista radiativa-convettiva.

Sulla base delle caratteristiche dell'impianto NORC (Non Organic Rankine Cycle) che si vorrebbe accoppiare alla caldaia a sali fusi, comunicate da ENEA, sono state fissate le temperature dei fluidi in ingresso e in uscita dello scambiatore di calore. In Tabella 42 si riportano i valori di temperatura utilizzati e le portate di sali e di fumi caldi calcolate per le due taglie di generatori.

Tabella 42.Temperature dei fluidi in ingresso e in uscita

		Temperatura lato fumi	Temperatura lato sali	Portata dei fumi	Portata dei sali
Temperatura in ingresso		900 °C	200 °C		
Temperatura in uscita		250 °C	500 °C		
Taglia del generatore	5 MWt			7,7 kg/s	11,8 kg/s
	1 MWt			1,54 kg/s	2,36 kg/s

Per lo scambiatore di taglia più piccola (1 MWt) si è ipotizzata, a seguito delle attività svolte nel primo anno, una configurazione a tubi di fumo ad assetto verticale in controcorrente per il quale, seguendo quanto emerso dallo studio effettuato, si è stimato il coefficiente di adduzione lato sale essere pari a 480 [W/m^2 °C], valore medio al variare della temperatura del sale nello scambiatore e per velocità di transito del sale tali da inquadrare il fenomeno di scambio termico in regime di convezione naturale.

Per lo scambiatore di taglia più grande (5 MWt), sempre in linea con i risultati ottenuti nel primo anno di attività, si è scelta una configurazione a tubi di sale con condizioni di flusso tali da assicurare lato sale una situazione di scambio termico di tipo a convezione forzata, con un coefficiente di adduzione di progetto pari a 2.000 [W/m^2 °C]. Nelle Tabelle 43 e 44 sono riportati i valori dei coefficienti utilizzati per i due casi.

Tabella 43. Valori utilizzati per il calcolo del coefficiente globale di scambio termico per lo scambiatore a tubi di fumo

Coefficiente di adduzione lato fumi	33	[W/m^2 °C]
Coefficiente di adduzione lato sali	480	[W/m^2 °C]
Spessore della parete metallica	0,003	[m]
Coefficiente di conducibilità termica	20	[W/m °C]
Coefficiente di scambio termico globale	31	[W/m °C]

Tabella 44. Valori utilizzati per il calcolo del coefficiente globale di scambio termico per lo scambiatore a tubi di sale

Coefficiente di adduzione lato fumi	33	[W/m^2 °C]
Coefficiente di adduzione lato sali	2000	[W/m^2 °C]
Spessore della parete metallica	0,003	[m]
Coefficiente di conducibilità termica	20	[W/m °C]
Coefficiente di scambio termico globale	32	[W/m °C]

Per il calcolo della superficie di scambio termico, assumendo una configurazione preliminare a flussi in controcorrente, si ottengono i risultati riportati in Tabella 45 per le due taglie di scambiatore, entrambi in una configurazione in controcorrente.

Tabella 45. Superfici di scambio termico per le due taglie di scambiatore

Taglia generatore	Superficie di scambio termico
5 MWt	920 m^2
1 MWt	190 m^2

I valori ottenuti saranno ulteriormente affinati in sede di progettazione, in forza delle considerazioni legate agli aspetti realizzativi. Nel caso dello scambiatore a tubi di sale si terrà conto di un'architettura che vede il percorso dei fumi ad U rovescia, con sezione preliminare di tipo radiativo e sezioni convettive a flusso incrociato. Per lo scambiatore a tubi di fumo, la configurazione prevista è effettivamente a flusso controcorrente, con fumi che fluiscono dall'alto verso il basso e con il sale in senso inverso, dal basso verso l'alto, per trarre giovamento dalla convezione naturale.

Di particolare interesse è infine la valutazione delle temperature di parete degli elementi metallici di interfaccia tra fumi e sali (Figura 100).

A tal fine si è effettuata un'analisi preliminare sula sezione sottoposta a maggior cimento termico, in cui la parete lambita dai sali si trova alla massima temperatura, pari a 500 °C, e quella a contatto con i fumi si trova a 900 °C, nell'assetto di scambio termico in controcorrente.

Per una parete in acciaio avente spessore pari a L=3 mm si ottengono i valori riportati in Tabella 46. L'analisi è stata condotta per la situazione (scambiatore a tubi di fumo) che vede una maggiore resistenza termica parete-sale. I valori di temperatura, sebbene orientativi, sono ampiamente compatibili con la temperatura limite per il sale.

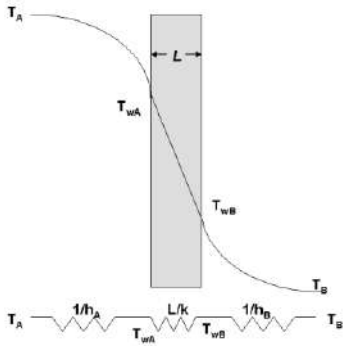


Figura 100. Rappresentazione del profilo di temperatura per lo scambio termico

Tabella 46. Valutazione delle temperature di parete scambiatore a tubi di fumo

Temperature			
Temperatura lato Fumi (T_A)		900	[°C]
Temperatura lato Sali (T_B)		500	[°C]
Coefficienti di scambio termico			
Coefficiente di adduzione lato fumi (h_A)	33		[W/m^2 °C]
Coefficiente di adduzione lato sali (h_B)		480	[W/m^2 °C]
Spessore della parete metallica (L)		0,003	[m]
Coefficiente di conducibilità termica (k)		20	[W/m °C]
Flusso termico calcolato			
Flusso termico specifico		12.430	[W/m^2]
Temperature di parete calcolate			
Temperatura di parete lato Fumi (T_{wA})		523	[°C]
Temperatura di parete lato Sali (T_{wB})		526	[°C]

Strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa

Lo strumento di calcolo per l'analisi dei sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa, la cui prima versione è descritta nel rapporto RdS/2013/263 della scorsa annualità, è stato ulteriormente sviluppato per introdurre nuove funzionalità [rapporto RdS/PAR2013/250].

Tale strumento è implementato in ambiente MATLAB® ed è finalizzato alla valutazione delle prestazioni di generatori di calore alimentati a biomassa solida con caldaia a sali fusi, al servizio di impianti di potenza per la produzione di energia elettrica. Sebbene il codice permetta di analizzare anche caldaie tradizionali a olio diatermico, l'attenzione verso i sali fusi è legata alla loro possibilità di fornire calore al gruppo motore a temperature superiori e in un campo di temperatura più ampio, consentendo così di aumentare il rendimento elettrico del ciclo.

Il codice di calcolo risolve le equazioni di bilancio di energia e di massa del sistema (il cui schema impiantistico è riportato in Figura 101) in condizioni stazionarie. Rispetto alla precedente versione, lo strumento di calcolo è stato sviluppato con nuove funzionalità:

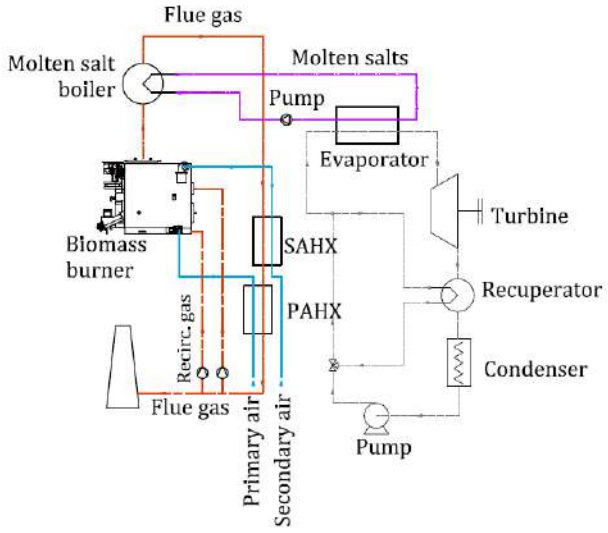


Figura 101. Schema dell'impianto modellato con il software MATLAB®, in cui sono evidenziati i componenti del generatore di calore a biomasse

- calcolo delle prestazioni del generatore di calore in condizioni di fuori progetto, con portata di biomassa variabile data in input;
- controllo del ricircolo fumi, suddividendo il ricircolo (richiesto dalla temperatura di *set point* dei fumi all'ingresso in caldaia) sotto e sopra griglia in base alla portata del ricircolo e alle condizioni di combustione e controllo dei flussi di aria primaria e di ricircolo fumi sotto griglia al fine di ottenere una combustione stechiometrica nella zona primaria della camera di combustione;
- controllo sulla temperatura di ingresso dei fumi nella caldaia, in funzione del contenuto di umidità del combustibile e dell'eccesso di ossigeno dei fumi;
- calcolo delle aree dei recuperatori di aria primaria e secondaria, per i quali si è scelta una configurazione a flussi incrociati;
- calcolo del punto di rugiada acido per gli ossidi di zolfo (SO_x) dei fumi.

E' in fase di sviluppo un'integrazione per il calcolo dell'area di scambio termico della caldaia a sali fusi, per la quale si è considerata una configurazione a tubi elicoidali e mantello, che è stata scelta sulla base dell'analisi dello stato dell'arte e di un'indagine di prodotto. Attualmente questa funzionalità è operativa solo per il codice che analizza le condizioni di progetto.

Si sono inoltre valutate le potenze degli ausiliari del generatore di calore, che concorrono a ridurre l'energia elettrica netta dell'impianto.

Alcuni risultati della nuove versione dello strumento di calcolo sono riportati nelle seguenti figure che evidenziano le potenzialità dello strumento in condizioni di fuori progetto. I risultati sono ottenuti adottando come

combustibile cippato di pioppo con un contenuto di umidità del 55% (in condizioni di progetto), fumi con 8% di ossigeno in eccesso, temperatura di ingresso in caldaia dei sali fusi e dei fumi pari, rispettivamente, a 220 e 950 °C, temperatura di preriscaldo dell'aria secondaria pari a 200 °C (l'aria primaria è fatta variare tra 90 °C e 150 °C) e un gruppo motore da 1 MW_e che in condizioni di progetto ha un rendimento elettrico nominale del 25%.

La Figura 102 riporta la potenza elettrica in funzione della portata e del contenuto di umidità della biomassa mentre la Figura 103 rappresenta il rendimento termico del generatore di calore e il rendimento elettrico del gruppo motore in funzione del contenuto di umidità del combustibile e della temperatura di preriscaldo dell'aria primaria (in condizioni di progetto).

I profili di temperatura riportati nella Figura 104, in particolare quello dei fumi in ingresso nella caldaia, mostrano come lo strumento di calcolo sia in grado di modellare le molteplici condizioni che si possono verificare in un generatore di calore a biomassa. Nel caso riportato, per un tenore di ossigeno nei fumi superiore al 10% (valore molto alto nei grossi impianti) e con la biomassa umida considerata, il generatore non è più in grado di garantire la temperatura di 950 °C all'ingresso in caldaia.

La temperatura dei fumi al camino è stata infine confrontata con la temperatura di condensa acida legata agli SO_x (H_2SO_3, H_2SO_4) calcolata dal modello, per verificare che non vi si determini una temperatura che potrebbe comportare il rischio di condensa acida.

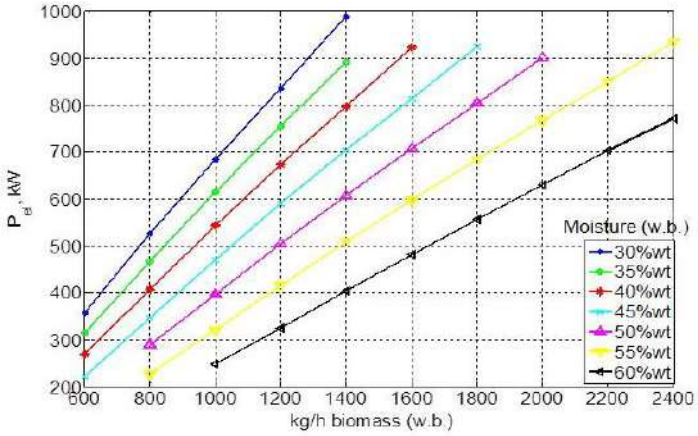


Figura 102. Potenza elettrica in funzione della portata e del contenuto di umidità della biomassa

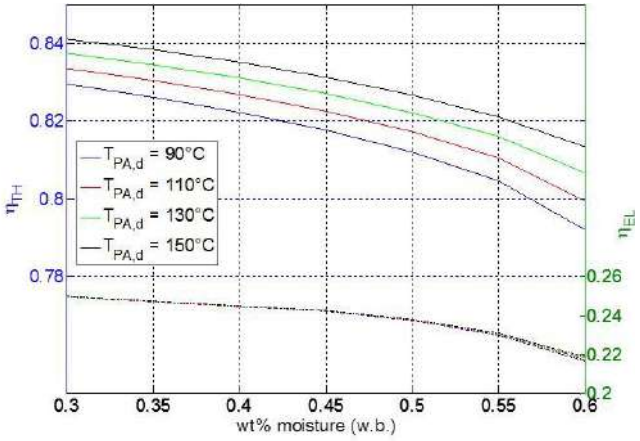


Figura 103. Rendimento termico del generatore di calore (η_{TH}) e rendimento elettrico (η_{EL}) del gruppo motore in funzione del contenuto di umidità del combustibile e della temperatura di preriscaldo ($T_{PA,d}$) dell'aria primaria (in condizioni di progetto)

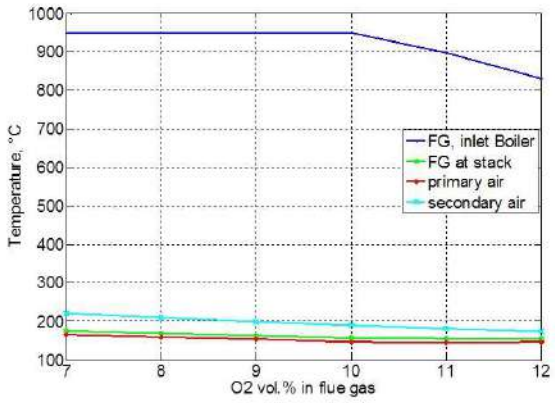


Figura 104. Temperature dei fumi (FG) all'ingresso nella caldaia (in blu) e al camino (in verde) e temperature di preriscaldo dell'aria primaria (in rosso) e secondaria (in azzurro) al variare del tenore di ossigeno dei fumi

Sono stati quindi analizzati limiti e potenzialità del codice implementato rispetto ai software commerciali ed è stata valutata la possibilità di integrazione con altri software di simulazione per analizzare le prestazioni di sistemi complessi. Nel corso della presente annualità, per confrontare i risultati ottenuti con il codice implementato si è utilizzato il software Cycle Tempo, in quanto rappresenta un ragionevole compromesso tra software più completi e i rispettivi costi di licenza. Inoltre, allo stato attuale dello sviluppo del codice, si è ritenuto che la libreria di componenti disponibili in Cycle Tempo fosse appropriata a operare confronti con lo strumento implementato.

L'analisi di tipo energetico è stata infine integrata con un'analisi economica che permette di calcolare in modo semplificato i principali indici economici dell'impianto nel suo complesso (tempo di ritorno dell'investimento semplice - PBT, valore attuale netto - VAN e tasso interno di rendimento - TIR) in funzione dello specifico regime di incentivazione previsto.

A tale proposito è stato predisposto un file di calcolo in ambiente Excel, costituito da diversi fogli di lavoro, per l'immissione dei dati di input di tipo economico ed energetico e per i calcoli degli indici necessari per il calcolo economico, quali il "Primary Energy Saving" -PVdF e le tariffe incentivanti ottenibili, per impianti di potenza con generatori di calore a biomassa. Gli incentivi cui ha diritto l'impianto vengono calcolati secondo quanto indicato nel DM 6/7/2012 e nel DM 5/9/2011, mediante una procedura che permette di calcolare le produzioni equivalenti di energia della macchina virtuale per la verifica del regime di cogenerazione ad alto rendimento (CAR).

I costi di realizzazione, esercizio e manutenzione dell'impianto vengono calcolati, sulla base di valori preimpostati di default o modificabili dall'utente, introducendo i principali parametri progettuali. Stimati i costi ed i ricavi derivanti dalla vendita dell'energia e dagli incentivi attualmente in vigore vengono calcolati in modo semplificato il PBT, il VAN e il TIR.

Il foglio di calcolo implementato è stato utilizzato per effettuare delle simulazioni economiche degli impianti analizzati.

c.2 Verifica del comportamento del $TiCl_4$ come fluido di lavoro

I risultati ottenuti nel corso della precedente annualità hanno evidenziato l'interesse ad approfondire le potenzialità dell'impiego - mai proposto in precedenza - del tetracloruro di titanio ($TiCl_4$) quale fluido di lavoro per motori a ciclo Rankine alimentati da fluidi termovettori ad alta temperatura (miscele di sali fusi).

I cicli Rankine basati sull'uso del $TiCl_4$ individuati sono caratterizzati da rendimenti di conversione e potenzialità maggiori rispetto ai cicli ORC attualmente in commercio. Tuttavia, il $TiCl_4$ presenta alcune criticità, in primis l'elevata reattività in presenza di acqua, e, non essendo noti utilizzi in applicazioni di potenza per questo fluido, si rende necessario provvedere ad ulteriori indagini, sia teoriche sia sperimentali, al fine di verificare aspetti di tipo chimico-fisico, progettuale e normativo propedeutici alla realizzazione di un impianto reale.

L'attività svolta nell'ambito del PAR 2013 della RdS era finalizzata all'analisi e risoluzione delle principali criticità emerse nel corso della precedente annualità, relative all'effettiva applicabilità del $TiCl_4$ quale fluido di lavoro fino a temperature di 500 °C in motori a ciclo Rankine, in modo da poter arrivare alla definizione delle principali caratteristiche progettuali dei componenti di impianto, alla scelta dei materiali e all'approfondimento tecnico ed economico di componenti specifici, quali le tenute dei componenti rotanti e il sistema di condensazione, con e senza doppio circuito ad olio. L'attività è stata completata dall'analisi degli aspetti di carattere normativo,

autorizzativo e di sicurezza inerenti la progettazione, la costruzione, la verifica, la messa in esercizio e la gestione di un impianto con unità di cogenerazione a ciclo Rankine operante con $TiCl_4$ [rapporto RdS/PAR2013/151].

Da una prima analisi della normativa vigente in merito all'impiego di sostanze chimiche non si evince nessuna particolare prescrizione per il tetracloruro di titanio, che sarà quindi soggetto alla comune normativa in merito alla sicurezza sui posti di lavoro. Per quel che riguarda invece gli aspetti relativi alle procedure autorizzative, prendendo in considerazione un'ipotetica installazione nell'area milanese, sono state utilizzate come riferimento le linee guida della Regione Lombardia e della Provincia di Milano, dalle quali si deduce che la realizzazione di un impianto a combustione di biomassa operante con sali fusi e tetracloruro di titanio avrà come principale fase critica la VIA, con particolare attenzione alla caldaia e alle sue emissioni.

Il $TiCl_4$ è ampiamente utilizzato in ambito industriale, quindi sono noti materiali idonei e le procedure operative da adottare per la conduzione di impianti operanti con questo fluido. Sono individuati compatibili al tetracloruro di titanio sia gli acciai inossidabili, anche ad alte temperature, che acciai dolci, mentre per le tenute un materiali idoneo è il PTFE.

Con l'ausilio del software Aspen Properties sono state indagate le proprietà chimico-fisiche di interesse per l'impiego del prodotto negli impianti allo studio e, utilizzando il componente aggiuntivo per Excel di Aspen Properties V8.4, sono stati calcolati i relativi valori nell'intervallo specificato di temperatura e pressione (20-550 °C; 0-55 barg). In particolare, sono stati determinati i punti necessari a rappresentare nel piano temperatura-entropia la curva limite del $TiCl_4$, oltre a isobare e isocore. Al variare di pressione e temperatura sono stati quindi calcolati i valori delle altre proprietà ritenute di specifico interesse per la ricerca in oggetto.

In Figura 105 sono riportati gli andamenti del calore specifico a pressione costante. I valori del C_p calcolati nell'intervallo 0,1 e 1 bar sono molto simili (come prevedibile, essendo trascurabili gli effetti di gas reale) e nella rappresentazione grafica le linee che descrivono i valori calcolati sono pressoché coincidenti, quindi nel grafico sono indicati come unica linea valida per l'intervallo 0,1-1 bar.

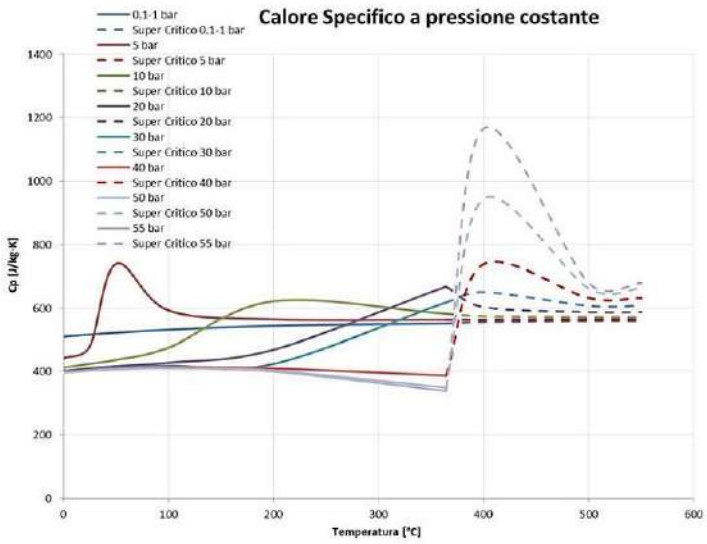


Figura 105. Valori del calore specifico a pressione costante calcolati nell'intervallo di temperatura 0-550 °C al variare della pressione nell'intervallo 0,1-55 bar

In Figura 106 è riportata la densità sia della fase liquida che della fase vapore. Per la fase liquida i valori sono funzione sia della pressione che della temperatura. Per la fase liquida sono funzione solo della temperatura.

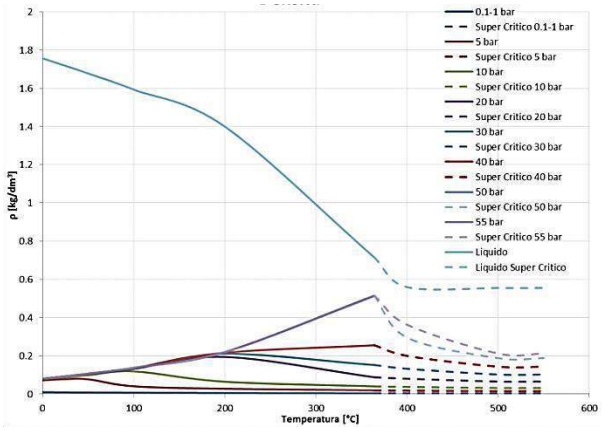


Figura 106. Valori della densità calcolati sia per la fase vapore che per la fase liquida nell'intervallo di temperatura 0-550 °C al variare della pressione nell'intervallo 0,1-55 bar

La viscosità sia per la fase vapore che per la fase liquida non è influenzata dalla pressione, mentre varia al variare della temperatura. I valori calcolati sono riportati in Figura 107.

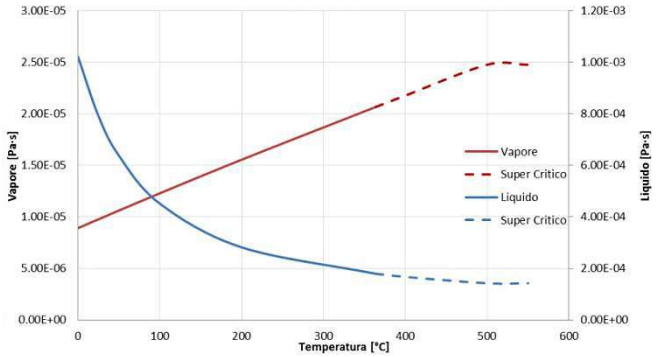


Figura 107. Valori della viscosità nell'intervallo temperatura 0-550 °C sia per la fase vapore che per la fase liquida, entrambe non influenzate dal valore di pressione

Infine, i risultati dei calcoli effettuati per determinare i valori della tensione di vapore per l'intervallo di temperatura 0-550 °C, mostrano che anche questa proprietà non è dipendente dalla pressione.

Analisi sperimentale della stabilità termica e chimica del TiCl4 e scelta dei materiali per componenti dell'impianto NORC

Il principale scopo di questa indagine, svolta dal Politecnico di Milano in collaborazione con l'Università di Brescia, è quello di indagare e caratterizzare la stabilità termica e chimica del $TiCl_4$ a contatto con potenziali materiali impiegabili alla costruzione di un impianto a ciclo Rankine con fluido di lavoro tetracloruro di titanio (NORC - Not Organic Rankine Cycle) [rapporto RdS/PAR2013/269].

Dalle esperienze maturate negli anni dal gruppo di ricerca con fluidi di origine organica, è emerso che la primaria criticità da indagare è la stabilità termica, dal momento che il fluido in esame dovrebbe lavorare a temperature superiori a quelle del normale impiego di fluidi organici, suscettibili di a decomposizione a temperature così elevate.

Indici di sicura decomposizione sono:

- un'eventuale variazione della pressione alla temperatura impostata;
- un sensibile scostamento della curva della tensione di vapore rispetto ai valori di riferimento per fluido "vergine".

La stabilità termochimica del $TiCl_4$ è stata indagata portando il campione di fluido in un apposito contenitore in acciaio AISI 316L - noto come acciaio ad altissima resistenza a corrosione e dotato di prestazioni elevate anche per

impieghi ad alte temperature - a temperature crescenti in un forno a muffola, e mantenendolo a temperatura costante per un numero prestabilito di ore (generalmente intorno alle 80). Il materiale adottato per le tenute dell'impianto sperimentale è il PTFE.

I risultati sperimentali mostrano che, dopo la permanenza del campione di fluido a 400, 500 e 550 °C, il $TiCl_4$ non sembra essersi decomposto in misura massiccia. Infatti, come si può vedere dal grafico di Figura 108, si notano sensibili scostamenti nella tensione di vapore fino a 100 °C, mentre salendo con la temperatura la curva della tensione di vapore del fluido coincide sostanzialmente con quella di riferimento. Nella figura si nota anche come le tensioni di vapore, passando da 400 a 550 °C, coincidano tutte, a riprova del fatto che il fluido non sembra subire un aumento della frazione degradata.

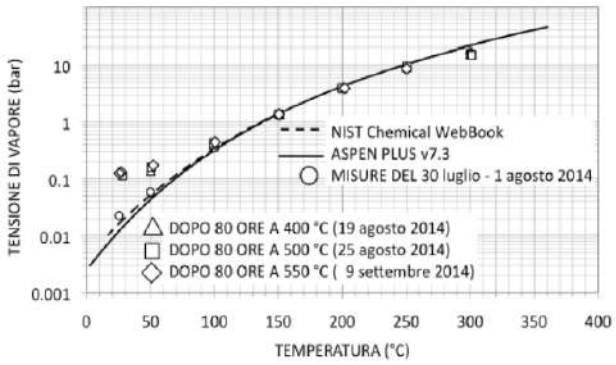


Figura 108. Tensione di vapore dopo la permanenza del campione di fluido a 400, 500 e 550 °C per 80 ore a confronto con i valori di riferimento

Sono state poi anche prove in presenza di provini metallici immersi nel fluido, e anche in questo caso non si è mai manifestata un'alterazione significativa del fluido stesso. In conclusione, si può affermare che Il $TiCl_4$ contenuto in acciaio AISI 316L si presenta come fluido molto stabile fino alle massime temperature testate (550°C).

Per quel che riguarda la scelta dei materiali per i componenti dell'impianto, una seconda serie di prove ha messo in evidenza la compatibilità del $TiCl_4$ con acciaio P91 (preso in considerazione in alternativa all'AISI 316L) e Cupronichel, lega generalmente impiegata nello scambiatore recuperativo a valle della turbina.

L'acciaio P91 è utilizzato in surriscaldatori di impianti di potenza operanti a ciclo a vapore acqueo alla temperatura di circa 620 °C, ed è stato quindi scelto per le parti calde (T > 200 °C) dell'impianto a contatto con $TiCl_4$. Per le parti calde non a diretto contatto con il fluido il materiale individuato è acciaio forgiato di comune impiego, mentre per quelle fredde acciaio al carbonio.

Riepilogando, i principali componenti di un impianto del tipo proposto saranno realizzati nei seguenti materiali:

- lo scambiatore di calore primario (con sali fusi) in acciaio P91,
- per la turbina:
  - palettatura in acciaio P91
  - cassa turbina in acciaio P91
  - albero in acciaio forgiato
  - rotore in acciaio forgiato
- il recuperatore termico a valle della turbina e a monte dello scambiatore primario in Cupronichel,
- la pompa di alimento in acciaio forgiato con tenute meccaniche lubrificate con olio compatibile,
- le tubazioni nelle parti calde con acciaio P91; le tubazioni fredde con acciaio al carbonio.

Dalle attività sperimentali sono stati dedotti ed adottati alcuni accorgimenti utili anche alla condotta di eventuali impianti. Data l'estrema reattività del $TiCl_4$ con l'acqua, anche sotto forma di vapore, un primo accorgimento deve essere adottato nel caricamento del fluido all'interno dell'impianto. Si propone di impiegare un eiettore a N_2 per tirare il vuoto nell'impianto in modo da evitare che dell'acqua, sotto forma di umidità, possa rimanere nelle condotte. Un'eventuale presenza di acqua creerebbe un deposito di solido, dovuto alla formazione di biossido di titanio, e un'indesiderata produzione di acido cloridrico. Quest'ultimo potrebbe essere rimosso dall'impianto in forma gassosa, ma a sua volta potrebbe reagire dando problemi di corrosione.

Dato che il condensatore lavora a pressioni sub-atmosferiche si può prevedere che, seppur in modeste quantità, alcuni gas possano essere richiamati all'interno dell'impianto. Per l'eliminazione di eventuali gas incondensabili richiamati nel ciclo o formatisi a causa di decomposizione del tetracloruro di titanio è, anche in questo caso, proposto l'uso di un eiettore funzionante ad azoto.

Eventuali ulteriori accorgimenti per l'impianto di potenza possono riguardare il tipo di alloggiamento da realizzare. Per isolare maggiormente l'impianto dall'ambiente esterno, questo può essere installato in container stagno.

Un monitoraggio del corretto isolamento da infiltrazioni dall'esterno può essere fatto adottando un sistema di analisi a valle dell'eiettore ad azoto impiegato per l'eliminazione di eventuali incondensabili. La presenza in fase gassosa di HCl sarebbe un campanello di allarme per individuare eventuali anomalie.

Approfondimento tecnico-economico

Sono state valutate le prestazioni e i costi di un impianto di potenza di 1 MW_e. Per il sistema di condensazione sono state indagate due configurazioni: con e senza circuito ad olio, approfondendo come questo circuito intermedio influisca sulle prestazioni di impianto e sui costi. I costi degli scambiatori sono stati calcolati con l'ausilio del software *Aspen Exchanger Design and Rating*. Il costo della turbina è stato calcolato usando correlazioni sviluppate *in-house*, mentre il *balance of plant* è stato determinato con metodologia disponibile in letteratura.

Lo schema base analizzato prevede un impianto cogenerativo. Data l'elevata reattività del $TiCl_4$ con l'acqua, si propone, in accordo con quanto già suggerito dagli studi svolti nel corso della precedente annualità della RdS, di realizzare un circuito ad olio che permette di non mettere direttamente in contatto la condotta contenente $TiCl_4$ con l'ambiente. Sarà infatti il circuito ad olio che scambierà con l'ambiente esterno (in questo caso rappresentato dal circuito per produzione di acqua calda) raffreddandosi con esso e riscaldandosi con il $TiCl_4$. A causa di questo circuito aggiuntivo sono previste delle temperature di condensazione superiori di circa 10 °C rispetto ad un caso in cui lo scambio di calore avvenisse direttamente con dell'impianto per produzione di acqua calda.

Dalle esperienze del mondo industriali in impianti frigoriferi sono noti impianti a tenuta senza particolari preoccupazioni di fuoriuscita del fluido di lavoro. Per questo motivo è stato indagato il caso in cui il condensatore possa scambiare direttamente con l'ambiente esterno, in questo caso rappresentato dal circuito ad acqua della cogenerazione.

I costi di investimento (assoluti e per kW di potenza installata) calcolati per le due configurazioni di impianto considerate sono riportati rispettivamente nelle Tabelle 47 e 48.

Tabella 47. Costi di investimento assoluti degli impianti analizzati

Condizioni operative		
P max, bar	50,00	
T max, °C	480,00	
T max aali, °C	500,00	
T min sali, °C	250,09	
Costi assoluti, €	**Con circuito olio**	**Senza circuito olio**
Scambiatore primario	179.400	179.400
Rigeneratore	24.492	24.640
Condensatore	260.373	288.512
Olio-Acqua a piastre	85.481	0
Dry cooler	43.100	41.779
Turbina	333.413	363.219
Pompa	6.271	6.074
Generatore elettrico	70.756	70.630
Moltiplicatore giri	28.302	28.252
BOP	618.953	601.504
Fluido	6.866	6.866
Totale ORC	1.657.408	1.610.876
Impianto biomassa	3.332.699,67	3.278.655,80
Opere civili e ingegneria	600.000	600.000

Tabella 48. Costi di investimento per kW installato degli impianti analizzati

Condizioni operative		
P max, bar	50,00	
T max, °C	480,00	
T max sali, °C	500,00	
T min Sali, °C	250,09	
Costi specifici, €/kW	**Con circuito olio**	**Senza circuito olio**
PHE	194	193
Rigeneratore	27	27
Condensatore	282	311
Olio-Acqua a piastre	93	0
Dry cooler	47	45
Turbina	361	392
Pompa	7	7
Generatore elettrico	77	76
Moltiplicatore giri	31	30
BOP	670	648
Fluido	7	7
Totale ORC	1.795	1.737
Impianto biomassa	3.609	3.535
Opere civili e ingegneria	650	647
Totale	7.848	7.655

La natura del fluido di lavoro non incide in misura significativa sul costo dell'impianto, dal momento che sono utilizzabili gli stessi materiali che si adotterebbero con altri fluidi di lavoro meno performanti.

c.3 Prototipi da laboratorio di sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 μm) e di composti organici presenti nelle emissioni gassose

Questa linea di ricerca aveva come obiettivo lo sviluppo, la caratterizzazione e la verifica sperimentale di filtri ceramici porosi per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte dalla combustione di biomassa solida, con particolare riferimento al particolato e ad inquinanti gassosi quali CO e Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).



Figura 109. Filtri realizzati per le prove allo scarico della caldaia presso ENEA Saluggia

Riprendendo gli studi e le analisi condotte durante la precedente annualità della RdS, presso il Centro Ricerche ENEA di Saluggia sono state effettuate ulteriori prove sperimentali su prototipi in scala di laboratorio di filtri catalitici tipo *wall flow* (Figura 109) esaminando il loro comportamento a contatto diretto con i fumi di combustione di una caldaia alimentata a pellet di legno [rapporto RdS/PAR2013/238].

Appurata infatti l'efficacia di tali dispositivi nel ridurre notevolmente le emissioni di particolato e di CO, l'attività sperimentale è proseguita nella ricerca della migliore configurazione e delle condizioni di esercizio ottimali per una loro applicazione concreta sugli impianti di combustione a biomassa.

A tal scopo, sono state indagate le caratteristiche principali dei materiali filtranti (porosità, percentuale di catalizzatore, temperatura di attivazione) e le conseguenti modalità di funzionamento dei filtri (perdite di carico, velocità superficiale dei fumi, velocità spaziale, temperature di esercizio) nell'ottica di ottimizzare la frequenza dei cicli di esercizio/rigenerazione, e verificare le prestazioni dei prototipi anche in seguito ad un loro primo utilizzo.

Per tali attività, ENEA si è avvalsa della collaborazione di FN S.p.A. per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali e le analisi sui campioni di IPA [rapporto RdS/PAR2013/239] e del Dipartimento di Ingegneria Industriale (Di.I.In.) dell'Università di Salerno per la realizzazione e la fornitura di dispositivi ceramici testati, per ulteriori analisi sui materiali utilizzati, e per lo studio di nuove sostanze ad azione catalitica, atte all'abbattimento di CO e degli idrocarburi gassosi a temperature prossime a quelle di scarico dei fumi di combustione [rapporto RdS/PAR2013/243].

Inoltre, attraverso la collaborazione tra ENEA e Di.I.In., e a partire dai risultati sperimentali ottenuti, sono stati condotti studi preliminari per il dimensionamento e lo scale up dei sistemi filtranti testati, in vista della realizzazione di un dispositivo pilota da inserire direttamente allo scarico della caldaia.

I risultati delle prove sperimentali hanno permesso l'analisi delle perdite di carico in funzione della porosità dei materiali filtranti, della percentuale in massa di catalizzatore, della temperatura di esercizio dei filtri, del carico di particolato e della velocità superficiale dei fumi, dimostrando che quest'ultima risulta il parametro più significativo nel caso di fumi "puliti", ossia caratterizzati da basse concentrazioni di particolato.

Lo studio di varie configurazioni geometriche, di varie tipologie di supporti, e di varie specie attive, ci permette di concludere che, in relazione alle prestazioni richieste in termini di efficienza di filtrazione (per l'abbattimento del particolato carbonioso) e di riduzione del CO, la configurazione ottimale è la seguente:

- il sistema filtrante deve avere la configurazione geometrica di tipo *wall flow*, in quanto consente di avere efficienze di filtrazioni superiori al 95%;
- il supporto deve essere in carburo di silicio (SiC), in quanto a differenza di altre matrici ceramiche (es. cordierite), tale materiale è caratterizzato da canali paralleli con pareti porose, il che consente il passaggio dei gas e non delle particelle solide. Inoltre il SiC ha una elevata conducibilità termica, il che consente di avere una più omogenea distribuzione della temperatura durante la fase di rigenerazione, evitando in tal modo l'instaurarsi di hot spot che potrebbero portare alla sua rottura.

Nonostante le elevate superfici filtranti generate in al modo, la configurazione geometrica *wall flow* essendo caratterizzata da dimensioni medie dei pori molto piccole, pari a circa 15 micrometri, e seppure le conseguenti perdite di carico sono in assoluto abbastanza limitate, non risultano ancora compatibili nella specifica applicazione richiesta, in particolare dopo la deposizione del catalizzatore, che comporta una sensibile riduzione del diametro medio dei pori.

Per quanto riguarda l'attività catalitica dei filtri, intesa come fase di rigenerazione degli stessi, i dati sperimentali sembrano evidenziare che la stessa velocità superficiale dei fumi (intesa in questo caso come tempo di residenza dei fumi a contatto col catalizzatore) ha un peso maggiore della velocità spaziale per quanto riguarda l'abbattimento del CO. Pur raddoppiando sostanzialmente il primo parametro, e abbassando la temperatura di lavoro di circa 100 °C (da 535 °C a 430 °C) si evince infatti che la riduzione della velocità superficiale dei fumi a circa 0,50 m/s (tempo di residenza del gas pari circa a 0,25 sec) comporta un notevole miglioramento nella riduzione di concentrazione dell'inquinante.

Si conferma invece in tutti i casi verificati un'alta efficienza di ritenzione del particolato fine (< 1 μm), sempre superiore almeno al 92%. Inoltre, sembra verificarsi una certa fase di termodistruzione della polveri organiche da parte del catalizzatore già a temperature superiori a 350 °C, soprattutto per velocità spaziali più basse (circa 3).

In base ai risultati ottenuti, ma anche in relazione a considerazioni di tipo operativo, si è individuata la percentuale ottimale in massa del catalizzatore sul filtro pari al 20 %.

Per quanto concerne la variazione della dimensione dei pori del materiale ceramico, i risultati sperimentali sembrano confermare che l'aumento di tale grandezza non comporta significativi benefici in termini di perdite di carico (ΔP), né sembra influenzare positivamente l'efficienza di ritenzione del particolato o l'azione del catalizzatore.

Una prova di durata, condotta ad una temperatura simile ai valori registrati in canna fumaria, con filtro a porosità originaria, in condizioni di funzionamento normali della caldaia (basso carico di inquinanti), e a velocità superficiale pari a circa 0,5 m/s, ha evidenziato delle perdite di carico lineari (pendenza costante) per tutto il periodo di campionamento, pari cioè a 180 minuti.

Si presume, quindi, che, nelle stesse condizioni operative, la frequenza di rigenerazione dei filtri, adeguatamente dimensionati per l'integrazione con i sistemi di generazione di calore, possa risultare per lo meno dell'ordine di qualche ora.

Al fine proprio di stimare con maggior dettaglio la durata massima dei filtri (intesa come periodo di esercizio durante il quale le perdite di carico mantengono un andamento crescente costante) è stato sviluppato in suite MatLab 7.0 un modello analitico che restituisce gli andamenti delle perdite di carico e dell'efficienza di ritenzione del particolato nel tempo, in funzione delle dimensioni dei filtri e delle caratteristiche della corrente gassosa da trattare (portata, carico di particolato, dimensioni delle polveri, etc.). Per verificare l'accuratezza del modello sviluppato, è stato effettuato il confronto tra i dati sperimentali ottenuti allo scarico della caldaia a biomasse disponibile presso il Centro ENEA di Saluggia ed i dati ottenuti utilizzando il modello descritto nel paragrafo precedente. I risultati sono riportati nella Figura 110.

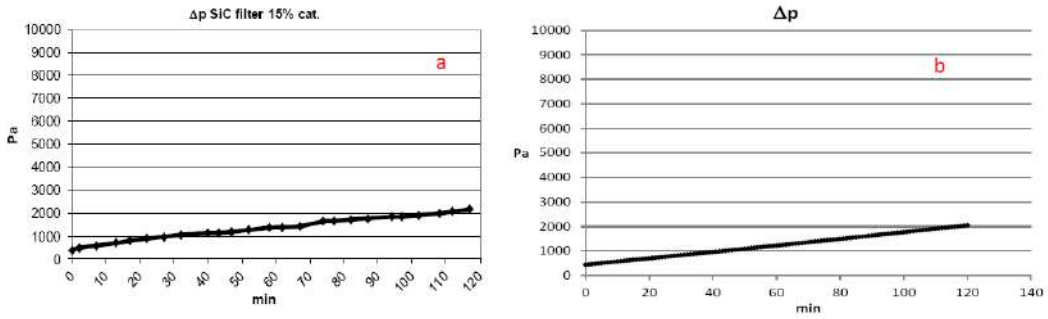


Figura 110. Confronto tra l'and amento del ΔP attraverso un filtro wall flow in SiC, sperimentalmente (a) e tramite il modello sviluppato (b)

Nel prosieguo dell'attività di ricerca, i progressi maggiori andranno sicuramente fatti nello studio della fase di rigenerazione dei filtri: ottenute infatti le prime indicazioni su velocità spaziale e tempo di residenza del gas, risultano ancora da indagare vari aspetti, come la modalità (presumibilmente mediante sistema a micro-onde) e la velocità di riscaldamento dei filtri, la durata della fase di rigenerazione, e il comportamento dei filtri ad alta temperatura.

Le prove preliminari condotte ad alta temperatura, infatti, sia su filtri nuovi che usati (provati, cioè, a seguito di un loro primo utilizzo a temperatura relativamente bassa, T = 170 °C), hanno sempre dimostrato un'efficace azione di termodistruzione delle particelle organiche (verificata mediante l'osservazione delle perdite di carico costanti durante la fase di rigenerazione), ma anche andamenti delle concentrazioni di CO (a volte anche mediamente superiori al caso di assenza totale dei filtri), che non sempre possono ricondursi alla fase di ossidazione delle particelle precedentemente adese alla superfice dei filtri.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

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 (biometano e idrogeno), ha determinato anche nel corso dell'annualità 2013 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 della Pubblica Amministrazione - come ad esempio il Tavolo di Filiera per le Bioenergie istituito presso il Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali, 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 http://www.ieabioenergy.com), nonché ad alcune iniziative sulle tematiche del presente progetto nell'ambito della European Energy Research Alliance (EERA).

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 dei seguenti Task:

- Task 33 - Thermal gasification of biomass (http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=33)
- Task 42 - Biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass (http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=42).

Il 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 al 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.

Il 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 (Jeju, Corea 11-13 novembre 2013 e Copenhagen 20-22 maggio 2014), 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 al Task 33, è stato organizzato dall'ENEA ad Ischia un primo meeting dove si è fatto il punto sull'aggiornamento degli impianti di gassificazione e sui principali usi finali a cui può essere destinabile il syngas, oltre al quello termo-elettrico. Sono stati presentati e discussi i principali risultati della ricerca e dello sviluppo industriale della tecnologia.

Nello stesso ambito, si è poi svolto un workshop avente come tema "Small scale gasification", al quale hanno preso parte aziende italiane ed estere impegnate nella produzione di energia elettrica dalla gassificazione delle biomasse, dove l'ENEA ha illustrato i risultati sperimentali delle attività svolte nell'ambito del PAR 2013 della RdS sulla gassificazione in acqua supercritica, nonché di altre attività in corso quale la gassificazione di lignina, sottoprodotto del processo di steam explosion, mediante l'uso di impianto pilota da 200 kWth a chiusura del ciclo di produzione del bioetanolo da biomasse.

A novembre 2014 è previsto in Germania il secondo incontro, che avrà come tema la produzione di bioliquidi da syngas. Nell'ambito della partecipazione al Task 42, nel 2013 sono state avviate numerose attività riguardanti la definizione di criteri di sostenibilità delle bioraffinerie, la classificazione dei principali schemi di bioraffineria, la valutazione delle tecnologie cosiddette "game changing". E' stato pubblicato uno studio sulle "Biofuels-driven Biorefineries"[12].

Ad ottobre 2013 è stato organizzato a Graz (Austria) un workshop nazionale degli stakeholder, dove ENEA ha presentato un quadro aggiornato sugli sviluppi delle bioenergie delle bioraffinerie in Italia, e, nell'ambito della conferenza Biorefinery for Food, Fuels and Materials (7-10 aprile 2014, Wageningen, Paesi Bassi) dove ENEA ha partecipato con un poster relativo ai risultati ottenuti nell'ambito del progetto dimostrativo europeo BIOLYFE, coordinato da BIOCHEMTEX (Gruppo M&G).

Nel 2014 è stata pubblicata una brochure descrittiva dei casi di successo delle bioraffinerie nel mondo. Rispetto alle precedenti pubblicazioni, sono presenti dati relativi all'Italia (www.IEA-Bioenergy.Task42-Biorefineries.com). E' stata completata l'elaborazione di "facts sheets" relativi alle principali tipologie di "piattaforme", come ad esempio la "2-platform (electricity&heat, syngas) - biorefinery using wood chips for FT-biofuels, electricity, heat and waxes with steam gasification", che saranno presto resi disponibili sul sito ufficiale del task 42.

Infine, è stata avviata un'indagine integrata sui vari paesi aderenti all'IEA Bioenergy, finalizzata ad identificare le strategie adottate dagli stati membri per la bioeconomia. I dati raccolti serviranno a rifocalizzare gli obiettivi di lavoro del Task 42 nel prossimo triennio 2016-2018. L'attività è stata finanziata dall'IEA ed è stata portata avanti da Austria (Joanneum Reserach Centre) e Italia (ITABIA-ENEA).

Nel corso della presente annualità ENEA ha curato inoltre la partecipazione nazionale alle attività di EERA (European Energy Research Alliance) sulla Bioenergia (SP5 Stationary Bioenergy).

Si segnala a tale riguardo la redazione del documento di sintesi predisposto per rispondere al questionario per la raccolta di contributi e opportunità per lo sviluppo delle bioenergie in ciascuna nazione partecipante ad EERA.

Si è inoltre partecipato all'aggiornamento ed alle definizione delle linee di attività previste per il prossimo triennio, proponendo attività di redazione di documenti e articoli tecnici di review, partecipazione a workshop tematici e svolgimento di studi e attività sperimentali. In particolare ENEA ha offerto le proprie competenze in ambito di sistemi di contenimento delle emissioni, effetti del particolato sulla salute e sull'ambiente e pretrattamenti per la produzione di biocombustibili densificati a partire da scarti di bioraffinerie.

Comunicazione e diffusione risultati

I risultati delle attività sono stati comunicati e diffusi in occasione di congressi, workshops e seminari sulle tematiche specifiche e mediante la pubblicazione di articoli su riviste nazionali e internazionali del settore.

[12] Scaricabile dal link http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/en/ieabiorefinery.htm.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Le attività del progetto sono state svolte in stretta collaborazione fra i ricercatori delle Unità Tecniche dell'ENEA e quelli delle strutture di ricerca universitarie riportate nel seguito.

- **Università della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche**
  "Trattamento biologico di biomasse lignocellulosiche e chitinose per la produzione di idrogeno e/o metano" (linea di attività a.1)
- **Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica**
  "Catalizzatori per l'upgrading del syngas nei processi di gassificazione delle biomasse con acqua in condizioni supercritiche" (linea di attività a.3)
- **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, c.3)
- **Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente**
  "Studio di un processo di separazione della CO_2 dal biogas mediante assorbimento con soluzioni amminiche in solvente organico" (linea di attività b.2)
- **Università di Chieti, Dipartimento di Farmacia**
  "Studio del processo di separazione della CO_2 dal biogas mediante formazione di idrati" (linea di attività b.2)
- **Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia**
  "Prestazione e caratterizzazione di sorbenti sperimentali per la cattura di CO2 da correnti gassose multicomponente" (linea di attività b.3)
- **Università di Bologna, Dipartimento di Chimica Industriale**
  "Sviluppo e caratterizzazione di catalizzatore di metanazione Ni/Mg/Al e preparazione per la produzione di pellet" (linea di attività b.3)
- **Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria**
  "Studio e progettazione di uno scambiatore del tipo a tubi di fumo e a tubi di sali per caldaie a sali fusi"(linea di attività c.1)
- **Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia**
  "Verifica del comportamento del TiCl4 come possibile fluido di lavoro" (linea di attività c.2)

FN, Nuove Tecnologie e Materiali Avanzati S.p.A.

FN S.p.A ha svolto attività relative alla caratterizzazione di supporti ceramici e di filtri catalitici per l'upgrading del syngas e l'abbattimento del particolato fine e del CO prodotti dalla combustione di biomassa lignocellulosica, con specifico riferimento rispettivamente ai sub-obiettivi b.3 e c.3.
In particolare, FN si è occupata della caratterizzazione di materiali, supporti e filtri ceramici realizzati presso il Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari" dell'Università di Bologna ed il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno, prima e/o dopo la verifica sperimentale del loro funzionamento, e dell'esecuzione di analisi di laboratorio per la determinazione di idrocarburi policiclici aromatici eventualmente presenti in campioni di condensato derivanti dalle prove sperimentali su caldaia svolte nell'ambito del sub-obiettivo c.3.

Energia elettrica da fonte solare
Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

L'approvvigionamento di energia rappresenta un fattore chiave per sostenere lo sviluppo dell'economia e, di conseguenza, il benessere della popolazione. In questo contesto lo sviluppo di tecnologie avanzate per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico (FV) può determinare una riduzione dei costi dell'energia elettrica, offrendo garanzie in termini di sicurezza di fornitura della stessa energia e di rispetto dell'ambiente. L'attività oggetto della presente linea di ricerca, puntando allo sviluppo di tecnologie FV a film sottile basate su materiali a basso costo, ampiamente disponibili e non tossici, offre la prospettiva di mettere a disposizione del Paese tecnologie fotovoltaiche avanzate che possono contribuire a rendere il sistema produttivo nazionale innovativo e competitivo in questo settore con evidenti benefici per l'utente del sistema elettrico. 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 Cu_2ZnSnS_4 e sullo sviluppo di celle FV organiche.

La tecnologia FV basata sui film sottili di silicio offre la possibilità di fabbricare moduli di area molto grande (fino a oltre 5 m^2), scalando su tali aree abbastanza efficacemente quanto sviluppato nei laboratori di ricerca su piccola area. Buona parte dei moduli disponibili sul mercato sono basati su dispositivi a multigiunzione che consentono di ottenere prodotti con buone prestazioni, stabili nel tempo. Molte industrie realizzano celle tandem a film sottile di silicio cosiddette micromorfe, realizzate utilizzando una giunzione anteriore di silicio amorfo e una posteriore di silicio microcristallino, mentre molte ricerche sono condotte sullo sviluppo di celle a tripla giunzione con lo scopo di migliore ulteriormente l'efficienza del prodotto. In questo contesto lo sviluppo di nuovi materiali con idonee proprietà ottiche ed elettriche è fondamentale per progettare dispositivi che assorbano al meglio lo spettro solare. Sempre nell'ambito della tecnologia del silicio, è ritenuto particolarmente rilevante lo sviluppo di celle a eterogiunzione a-Si/c-Si basate su wafer sottili. Tale tecnologia, infatti, consente di puntare nel breve termine a efficienze di conversione confrontabili con quelle dei dispositivi classici in c-Si, mantenendo potenzialmente bassi i costi di produzione. In entrambi gli approcci, sia che si usino film sottili di silicio amorfo e microcristallino sia che si usino wafer sottili di silicio cristallino, le strategie di intrappolamento della radiazione solare sono fondamentali per assicurare un efficace assorbimento della radiazione solare.

Lo studio del Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) come materiale innovativo per la realizzazione di celle fotovoltaiche a film sottile è un argomento che sta raccogliendo un interesse sempre maggiore. L'attività nasce con l'obiettivo di superare il problema della scarsa disponibilità di indio contenuto nei moduli in CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) e CIS (Copper Indium Selenide) attualmente in produzione. Il CZTS ha infatti la stessa struttura cristallografica del CIS con la differenza che l'indio è sostituito dalla coppia zinco-stagno ed il selenio è sostituito dallo zolfo. Oltre alla possibilità di sviluppare celle a film sottile con prestazioni analoghe a quelle del CIGS (efficienza > 20%), ma senza utilizzare elementi rari, un ulteriore fattore che contribuisce ad attirare l'attenzione sul CZTS è la possibilità di realizzare celle tandem che possano superare la barriera del 33% di efficienza imposta dalla termodinamica ai dispositivi basati su una singola giunzione.

Negli ultimi anni la ricerca sulle celle fotovoltaiche organiche ha portato a notevoli miglioramenti grazie alla sintesi di materiali sempre più efficienti e con uno spettro di assorbimento più idoneo alla cattura della radiazione solare. Lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. Per quanto riguarda l'impatto di tale tecnologia sul mercato, si iniziano a vedere prototipi con tali dispositivi che si adattano bene all'elettronica di consumo. 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.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale del progetto è la messa a punto di tecnologie avanzate nel campo del fotovoltaico a film sottile con:

- il miglioramento delle prestazioni di celle solari a film sottile di silicio e utilizzanti wafer sottili di silicio per un'applicazione industriale nel breve-medio termine;

- lo sviluppo di materiali che consentano di superare i problemi legati alla scarsa disponibilità di indio, limite principale della tecnologia FV a film sottile di CIGS;
- lo sviluppo di nuovi materiali per celle solari innovative a base di polimeri.

L'attività sulle celle solari a film sottile di silicio ha avuto l'obiettivo di sviluppare materiali innovativi e appropriate architetture di dispositivo con lo scopo di migliorare le attuali prestazioni delle celle. In particolare è stato sviluppato uno strato assorbitore innovativo ad alta gap di energia a base di ossido di silicio amorfo idrogenato depositato mediante tecnica CIGS Un materiale ad alta gap, infatti, può essere utilmente applicato in celle a multigiunzione, consentendo, inoltre, di incrementare la tensione di circuito aperto del dispositivo.

La ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili è proseguita lavorando all'ottimizzazione del contatto frontale e dello strato passivante intrinseco utilizzato all'interfaccia tra il wafer di silicio e l'emitter. Per quanto riguarda il contatto frontale, sono state ottimizzate le proprietà dell'ossido trasparente e conduttore (TCO) e sono stati valutati eventuali danneggiamenti occorrenti quando esso viene depositato sull'emitter. Inoltre si è lavorato all'ottimizzazione del contatto TCO/Ag serigrafico, agendo ancora una volta sul TCO e modificando in maniera opportuna la pasta di argento utilizzata per il processo di serigrafia.

Per quanto concerne lo sviluppo della passivazione della superficie di wafer di c-Si, è stato condotto uno studio sistematico delle proprietà passivanti di film sottili di silicio amorfo idrogenato depositati mediante VHF PECVD in varie condizioni di processo, variando in particolare la composizione dei gas di processo (silano, idrogeno) e la frequenza di eccitazione del plasma. In alternativa allo strato intrinseco in silicio amorfo si è anche effettuato uno studio preliminare sulla passivazione con il più trasparente ossido di silicio amorfo ottenuto in vari regimi di crescita. Per valutare le proprietà passivanti degli strati studiati, essi sono stati utilizzati per la fabbricazione di dispositivi ad eterogiunzione, utilizzando una struttura test non ottimizzata in termini sia di contatto frontale che posteriore. Su tali dispositivi è stata misurata un'efficienza massima del 17,4% su area attiva che consente di ritenere che efficienze di conversione >18%, obiettivo previsto per questa linea di attività, possano essere ottenute a breve con l'architettura ottimizzata.

Nell'ambito dello sviluppo di celle solari a film sottile policristallino di Cu_2ZnSnS_4 sono state esplorate diverse strade per aumentare l'efficienza delle celle fotovoltaiche. In particolare si è lavorato all'ottimizzazione della stechiometria del CZTS, servendosi anche di array di dispositivi fotovoltaici caratterizzati da materiali con stechiometrie diverse. Sono stati indagati inoltre vari parametri e step di processo (pressione di sputtering dei precursori, interfaccia CZTS/Mo, processo di deposizione del CdS, etc). Ognuna di queste strade ha portato ad una comprensione più approfondita della struttura del materiale e delle sue proprietà come assorbitore nelle celle fotovoltaiche di nuova generazione. Infatti, i risultati ottenuti hanno consentito di individuare i problemi più importanti su cui concentrare le future sperimentazioni e consolidare le attuali efficienze di conversione fotovoltaica intorno al 6% su un consistente numero di campioni e quindi su aree maggiori rispetti a quanto ottenuto nello scorso anno di attività. Questo risultato è ben più importante rispetto al singolo valore di efficienza da raggiungere del 7% perché garantisce la ripetibilità del materiale stesso, aspetto non trascurabile nell'ambito delle celle a film sottile. Nell'ambito, poi, dello sviluppo di tecniche di deposizione del CZTS da liquido, è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di deposizione del CZTS da soluzioni mediante *dip-coating* e si è dato inizio ad un nuovo filone di attività sulla preparazione di dispersioni di nanoparticelle di CZTS e sul loro utilizzo per la crescita di film compatti da usare per la realizzazione di dispositivi fotovoltaici. Quest'ultima tecnica sembra essere particolarmente promettente.

E' iniziato, infine, uno studio di materiali per celle solari tandem CZTS/c-Si. In particolare si è cercato di valutare quali materiali possano essere utilizzati per la realizzazione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle. Il lavoro, in fase preliminare, ha indagato alcune possibilità: il drogaggio di tipo p del CZTS, l'utilizzo di uno strato di MoO_3 o di uno strato di NiO.

Infine lo sviluppo di celle fotovoltaiche organiche ha avuto l'obiettivo di migliorare le prestazioni delle celle stesse seguendo due possibili strategie: ampliare lo spettro della radiazione solare efficacemente utilizzato dai dispositivi e migliorare il trasporto elettrico delle cariche.

Relativamente al primo approccio sono stati sviluppati strati luminescenti in grado di convertire lunghezze d'onda a più alta energia, non efficientemente assorbite dal materiale attivo, in fotoni di energia compresa nell'intervallo spettrale di assorbimento delle celle organiche. Sono state sviluppate differenti tipologie di materiali da applicare esternamente al cuore del dispositivo o come strati intermedi tra il contatto frontale e lo strato assorbitore della cella (in questo caso il materiale deve avere opportune caratteristiche elettriche). Quest'ultima soluzione ha consentito di ottenere dispositivi sui quali è stata misurata un'efficienza di conversione di poco superiore all'8%.

Sono proseguiti, inoltre, gli studi sullo sviluppo di nanocompositi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati da utilizzare come matrice per l'infiltrazione selettiva di molecole organiche attive in modo da sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali assorbitori.

Le attività del progetto si articolano in quattro obiettivi intermedi, corrispondenti a diverse linee di ricerca, più un obiettivo specifico relativo ad attività di comunicazione e diffusione dei risultati:

a. Materiali e architetture di dispositivo per celle a multigiunzione basate su film sottili di silicio
b. Celle a eterogiunzione a-Si/c-Si su wafer sottili di silicio
c. Celle a film sottili policristallini a base di Cu_2ZnSnS_4
d. Sviluppo celle organiche
e. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Materiali e architetture di dispositivo per celle a multigiunzione basate su film sottili di silicio

Le ricerche svolte nell'ambito della tecnologia FV a film sottile di silicio mirano nel breve termine a migliorare le efficienze di conversione in modo da ottenere dispositivi con prestazioni analoghe a quelle dei prodotti standard in silicio cristallino presenti nel mercato, con costi competitivi. A tale scopo appare necessario sviluppare celle a tripla giunzione (Figura 111a) il cui utilizzo può consentire di allargare la regione dello spettro della radiazione solare che contribuisce alla generazione di cariche e di ridurre il degrado iniziale dell'efficienza dovuto alla stessa radiazione grazie all'utilizzo di strati assorbitori molto sottili. Inoltre è fondamentale sviluppare appropriate strategie che consentano un efficace intrappolamento della radiazione solare (Figura 111b) con l'intento di ridurre al massimo lo spessore degli strati attivi, assorbendo al contempo efficacemente la stessa radiazione. L'attività svolta ha, pertanto, avuto la finalità di sviluppare nuovi materiali assorbitori utili alla fabbricazione di dispositivi a tripla giunzione (subtask a.1) e di ottimizzare l'intrappolamento della luce nella regione attiva della cella, operando sia sulla parte frontale che posteriore della cella (substask a.2 e a.3).

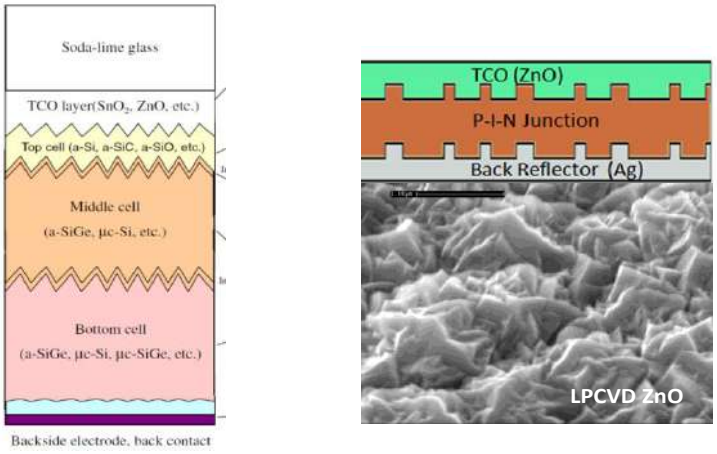


Figura 111. (a) Schema di una cella a tripla giunzione in cui vengono indicati i possibili strati assorbitori per le varie celle componenti (b) strategie di intrappolamento della luce

a.1 Sviluppo di materiali assorbitori ad alta energia di gap per celle a tripla giunzione

Lo sviluppo di celle a film sottile di silicio a tripla giunzione è oggetto di un forte interesse da parte della comunità scientifica che opera nel settore dei film sottili di silicio per migliorare le efficienze attuali dei moduli basati su tale tecnologia. Lo sviluppo di materiali assorbitori caratterizzati da gap di energia (E_g) maggiore rispetto ai valori tipici del silicio amorfo (1,75 eV) è fondamentale per poter progettare in maniera adeguata la struttura a tripla giunzione. Analisi teoriche suggeriscono che record di efficienza possono essere ottenuti utilizzando nella cella anteriore materiali caratterizzati da E_g di circa 2 eV, consentendo di aumentare la tensione di circuito aperto del dispositivo per effetto del maggior valore di E_g. Lavori di letteratura hanno poi dimostrato la possibilità di ottenere celle solari a singola giunzione con tensioni di circuito aperto superiori a 1 V, utilizzando strati assorbitori a base di film sottili di ossido di silicio amorfo idrogenato (a-SiO_x:H). Queste considerazioni sono alla base del lavoro svolto

nella presente annualità sullo sviluppo di strati assorbitori in a-SiO_x:H caratterizzati da alta gap di energia. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/PAR2013/001.

I film di ossido di silicio (a-SiO_x:H) sono stati depositati mediante la tecnica Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (VHF-PECVD) a 40 MHz su substrati di vetro Corning Eagle XG di area 10x10 cm^2 riscaldati a 150 °C in una delle camere di processo di un sistema di deposizione a multicamera (MVSystems Inc., Golden, CO). La miscela di gas era composta da silano (SiH_4), biossido di carbonio (CO_2) e idrogeno (H_2). Il flusso di SiH_4 è stato tenuto costante a 6 sccm, mentre quello di CO_2 e H_2 è stato variato rispettivamente nell'intervallo 0,5-4 sccm e 40-160 sccm. Le alte diluizione utilizzate per l'idrogeno sono necessarie per ridurre la densità dei difetti che tende ad aumentare con la concentrazione di ossigeno in modo da preservare la qualità del materiale per l'applicazione nei dispositivi. Per quanto riguarda gli altri parametri di deposizione, la pressione in camera è stata fissata a 0,5 torr, mentre sono stati utilizzati differenti valori per la potenza del plasma (in questa sintesi verranno discussi prevalentemente i dati relati ai test eseguiti a potenza pari a 4 W).

Prima di testare i materiali nei dispositivi è stata eseguita una caratterizzazione ottica ed elettrica dei singoli strati cresciuti su vetro con uno spessore di circa 200 nm. L'evoluzione della gap di energia, qui parametrizzata mediante il valore E_{04} (energia alla quale il coefficiente di assorbimento raggiunge 10^4 cm^{-1}), in funzione del flusso di CO_2 (a H_2=120 sccm) e di H_2 (a CO_2= 3 sccm) è riportata rispettivamente nelle Figure 112a e 112b.

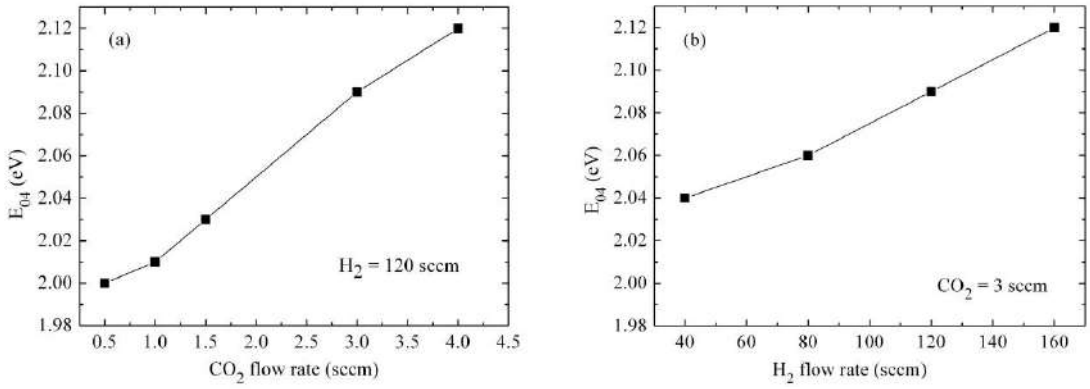


Figura 112. Valori di E_{04} in funzione del flusso di (a) CO_2 a H_2 = 120 sccm e (b) H_2 a CO_2 = 3 sccm

In entrambi i casi si osserva un incremento della gap del materiale in quanto l'incorporazione sia di atomi di ossigeno che di idrogeno comporta un incremento di tale parametro. Tuttavia considerando gli intervalli investigati per i due parametri (H_2 e CO_2) è evidente che l'ossigeno agisce in maniera più efficace sulle proprietà ottiche del materiale. Il massimo valore di E_{04} raggiunto, 2,12 eV, è ben più alto rispetto a quello del silicio amorfo (a-Si:H) utilizzato nel nostro laboratorio per celle di tipo standard (1,9 eV).

Le proprietà elettriche dei film sono state analizzate mediante misure di conducibilità in condizioni di buio (σ_D) e sotto illuminazione (σ_L). Sono stati ottenuti valori compresi nell'intervallo 10^{-10}-10^{-11} S/cm per σ_D, mentre la fotoconducibilità (σ_L/σ_D), che ci dà la misura di quanto il materiale risponde alla radiazione solare, varia dai 3 ai 4 ordini di grandezza. In particolare fotoconducibilià più basse sono state valutate all'aumentare di CO_2 dove entrambi, σ_D e σ_L, tendono a ridursi principalmente per effetto dell'aumento della gap dei materiali.

Per valutare la qualità dell'a-SiO_x:H come strato assorbitore di una cella solare, sono stati fabbricati dispositivi a singola giunzione p-i-n cresciuti su vetri ricoperti di ossido trasparente e conduttivo di tipo commerciale (Asahi VU-type). La struttura della cella consiste di uno strato p di silicio-carbonio amorfo di spessore 10 nm, di uno strato assorbitore intrinseco spesso 150 nm e di uno strato n di silicio microcristallino di spessore 30 nm. Generalmente vengono utilizzati degli strati buffer alle interfacce p-i e i-n che consentono di incrementare le tensioni di circuito aperto dei dispositivi. In questo studio nessuno strato buffer è stato utilizzato alle interfacce in modo da valutare le proprietà degli strati di a-SiO_x:H senza l'influenza di altri parametri. Tuttavia i risultati di seguito riportati possono essere migliorati applicando opportuni buffer adatti agli strati assorbitori sviluppati. Le celle sono state caratterizzate mediante misure della caratteristica I-V e misure di efficienza quantica esterna (EQE). Le prestazioni delle celle sono state confrontate con quelle di una cella standard in a-Si:H, realizzata con lo stesso spessore dello strato assorbitore.

I valori di fill factor (FF) della celle in a-SiO_x:H sono dell'ordine del 50%, ben al di sotto di quelli valutati sulla cella standard (circa 70%). La riduzione del FF è dovuta all'aumento della resistenza serie che diventa pari a 2-3 volte il valore della resistenza serie della cella di riferimento. Tale aumento è stato principalmente attribuito agli strati drogati: le proprietà di tali strati, sviluppati per le celle standard in silicio amorfo, non sono probabilmente appropriate per l'utilizzo con strati assorbitori ad alta gap.

La Figura 113a riporta la EQE di dispositivi con a-SiO_x:H depositato a H_2=120 sccm, potenza di 4 W e diversi valori di flusso di CO_2 (per CO_2 = 3 sccm è stata utilizzata anche una potenza di 6 W). Nella stessa figura è anche riportata la EQE della cella standard (curva nera). A parità di potenza di plasma, al crescere del flusso di CO_2, l'aumento della gap di energia dei film assorbitori determinato dall'aggiunta di atomi di ossigeno comporta una progressiva riduzione della EQE, e conseguentemente della corrente di corto circuito, causata dal ridotto assorbimento di fotoni a bassa energia.

Dal confronto delle celle con a-SiO_x:H cresciuto a CO_2=3 sccm a diverse potenze di plasma si osserva un allargamento della EQE verso la regione delle basse lunghezze d'onda nel caso di potenza più bassa (4 W) imputabile alla riduzione del bombardamento ionico all'interfaccia p-i con la potenza che determina una migliore qualità di questa interfaccia.

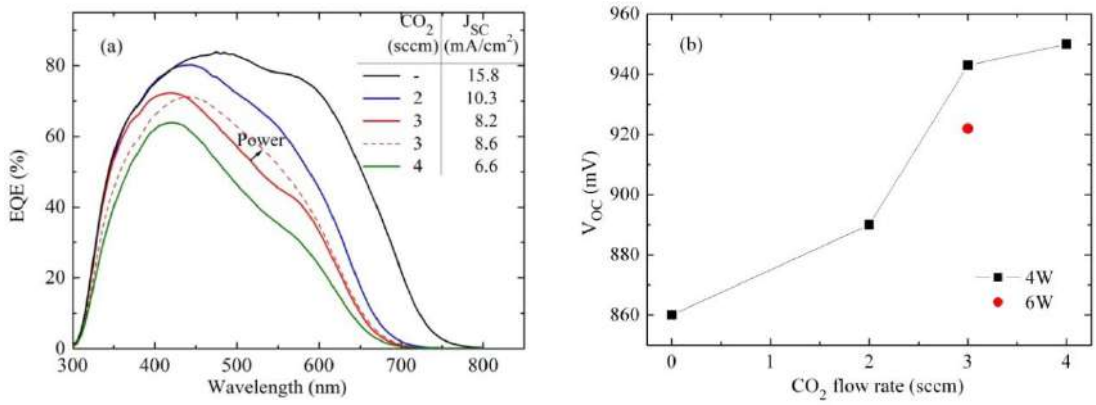


Figura 113. (a) EQE delle celle solari in a-SiOx:H ottenute a differenti valori del flusso di CO_2, fissando H_2 =120 sccm e potenza del plasma pari a 4 W. Nella figura è anche mostrata la EQE della cella ottenuta a CO_2= 3 sccm e potenza pari a 6 W (curva rossa tratteggiata) e le densità di corrente di corto circuito JSC dellecelle. (b) VOC delle stesse celle. Per confronto sono anche riportate la EQE (linea nera) e la VOC (punto a CO_2= 0 sccm) della cella standard in (a)

La Figura 113b mostra i valori di V_{OC} delle stesse celle. Partendo dal valore misurato sulla cella standard (860 mV), si osserva un aumento della V_{OC}, dovuto all'allargamento della gap dei materiali, fino a 950 mV ottenuto a CO_2 = 4 sccm. La consistente riduzione della V_{OC} (da 943 a 915 mV) osservata a CO_2 = 3 sccm quando la potenza di plasma viene aumentata da 4 a 6 W conferma che l'utilizzo di un più basso valore della potenza garantisce una migliore interfaccia p-i. E' ben noto, infatti, che la tensione di circuito aperto è influenzata dalla qualità delle interfacce ed in particolare di quella depositata per prima, nel nostro caso quella p-i.

L'effetto della diluizione di idrogeno sulle prestazioni delle celle è stato studiato fissando il valore di CO_2 pari a 3 sccm e variando il flusso di H_2 nell'intervallo 40-160 sccm. In Figura 114a sono riportati gli spettri di EQE delle celle. Si può notare un iniziale aumento della EQE, e di conseguenza della J_{SC}, quando H_2 passa da 40 a 80 sccm. Tale incremento è probabilmente imputabile ad una migliore qualità dell'a-SiO_x:H quando il contenuto di idrogeno aumenta, visto che l'aumento della gap del materiale con l'idrogeno dovrebbe invece agire riducendo la corrente di corto circuito del dispositivo. Un ulteriore aumento dell'idrogeno comporta invece una riduzione della EQE particolarmente evidente al valore più alto di H_2 (160 sccm) dove è stata valutata una J_{SC} pari a 7,8 mA/cm^2. Per valori di H_2 nell'intervallo 80-160 sccm osserviamo quindi l'attesa riduzione di J_{SC} principalmente dovuta alla diminuzione della gap di energia con l'aumento della diluizione di H_2. Un'ulteriore comprensione dell'influenza della diluizione di H_2 può venire dall'analisi della V_{OC} delle celle in funzione di H_2 (Figura 114b). Dalla figura risulta che la V_{OC} prima aumenta per effetto dell'allargamento della gap del materiale, poi si riduce per H_2=160 sccm; la presenza di zone porose nel materiale assorbitore e/o la prossimità della regione di transizione tra struttura amorfa e microcristallina può spiegare la forte riduzione di V_{OC} osservata alle alte diluizioni di H_2.

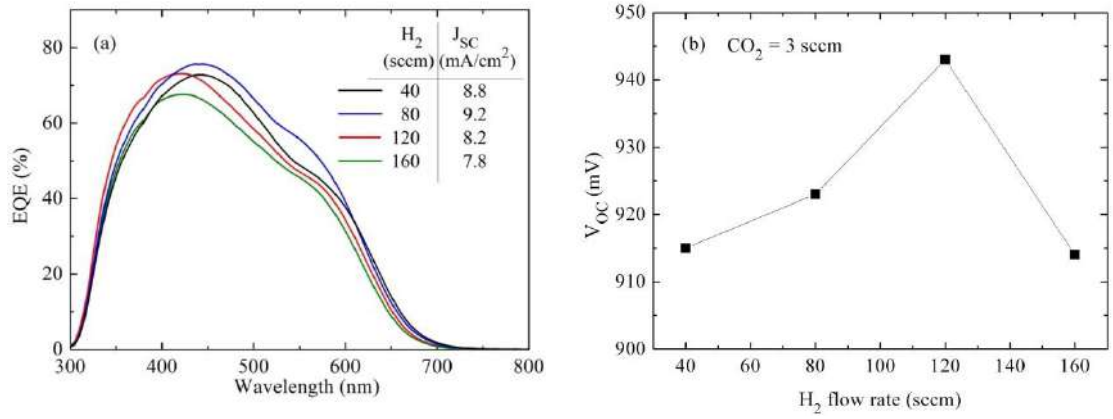


Figura 114. (a) Efficienza quantica esterna di celle solari in a-SiO_x:H ottenute a differenti valori del flusso di H_2 e (b) corrispondenti valori di V_{OC}

Infine è stato investigato l'effetto della temperatura di deposizione sulle prestazioni dei dispositivi. In particolare, ponendo H_2 = 120 sccm, CO_2 = 3 sccm e potenza= 4 W, è stata innalzata la temperatura di deposizione dello strato assorbitore da 150°C a 200°C. La Figura 115 mostra gli spettri delle EQE misurate sulle celle cresciute alle due differenti temperature. A T =200 °C si osserva un allargamento della EQE nella regione delle alte lunghezze d'onda, mentre valori più bassi della EQE sono stati misurati nella regione blu dello spettro solare. L'andamento osservato ad alte lunghezze d'onda può essere dovuto ad un processo di effusione dell'idrogeno e anche ad una differente incorporazione di ossigeno a 200 °C, che comporta una riduzione della gap del materiale. Questa ipotesi è supportata dalla forte riduzione della tensione di circuito aperto: la V_{OC} passa dal valore di 943 mV, misurato sul dispositivo depositato a 150 °C, a 870mV su quello depositato a 200 °C. Tuttavia, considerando la riduzione della EQE osservata a basse lunghezze d'onda, il valore della V_{OC} valutato a 200 °C può essere influenzato anche dalla qualità dell'interfaccia p-i. Infatti durante la deposizione dello strato assorbitore ci può essere un effetto di diffusione del boro dallo strato sottostante (il boro viene utilizzato per il drogaggio di tipo p). Questo effetto è enfatizzato a temperature del substrato maggiori e determina un peggioramento di tipo sia ottico che elettrico dell'interfaccia p-i. E' stato allora fabbricato un altro dispositivo con i primi 15 nm dello strato assorbitore depositati a 150 °C e lo spessore rimanente a 200 °C. Su quest'ultimo dispositivo è stata misurata una migliore V_{OC} (900 mV contro 870 mV misurati sulla cella cresciuta interamente a 200° C) e la EQE (curva nera tratteggiata in Figura 115) segue il massimo delle due curve ottenute per le celle cresciute interamente a 150 °C e a 200°C. Questi elementi confermano che le condizioni di crescita definite fissando H_2=120 sccm, CO_2 = 3 sccm, potenza = 4 W e T = 150 °C favoriscono la realizzazione di una buona interfaccia p-i.

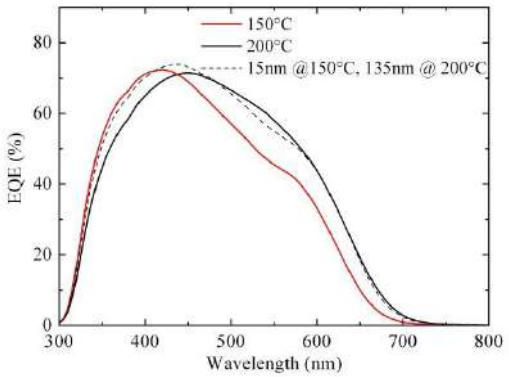


Figura 115. EQE di celle in a-SiO_x:H cresciute a 150 °C (linea rossa), 200 °C (linea nera) e con i primi 15 nm dello strato assorbitore a 150 °C e lo spessore rimanente a 200 °C (linea nera tratteggiata)

Le celle fino ad ora discusse sono realizzate, come detto, su substrato Asahi VU-type che risulta particolarmente indicato per giunzioni singole e tandem, dove è maggiormente determinante la necessità di un ottimo intrappolamento della luce. Tuttavia su tale tipologia di substrato l'aumento di bandgap dello strato assorbitore può non riflettersi pienamente sulla tensione di circuito aperto. Infatti substrati molto rugosi possono favorire la crescita di zone porose nel materiale che deteriorano le proprietà elettriche del dispositivo, agendo in particolare sulla V_{OC} e sul FF. Quindi per celle triple, visto che le correnti in gioco sono più basse rispetto ai valori tipici di celle

a singola e doppia giunzione, può essere conveniente utilizzare substrati meno rugosi. Non avendo a disposizione substrati ottimizzati per celle triple, si è voluto, tuttavia, completare la caratterizzazione dell'a-SiO_x:H, inserendolo come strato assorbitore in celle cresciute su substrato flat. E' stato quindi depositato un film di ZnO per sputtering su vetro flat e su di esso è stata fabbricata una cella in a-SiO_x:H, scegliendo come condizioni di crescita quelle che hanno dato i risultati più incoraggianti (H_2=120 sccm, CO_2 = 3 sccm, potenza = 4 W e T = 150 °C). In Figura 116 è mostrata la caratteristica I-V della cella su cui è stata misurata una V_{OC} di poco superiore a 1 V, valore che risulta molto maggiore rispetto a quello misurato sull'analogo dispositivo cresciuto su substrato rugoso (943 mV). Al contempo la forma della curva I-V rende evidenza di un FF molto basso (circa 40%), dovuto essenzialmente alla qualità dell'elettrodo frontale. Questo aspetto non è comunque significativo in quanto le proprietà del film di ZnO non sono assolutamente confrontabili con quelle del TCO commerciale utilizzato in tutti i precedenti esperimenti.

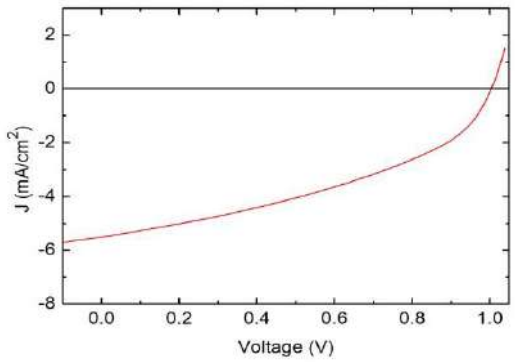


Figura 116. Caratteristica I-V della cella in a-SiOx:H cresciuta su substrato flat. Condizioni di deposizione dello strato intrinseco: H_2=120 sccm, CO_2=3 sccm, Potenza=4 W e T=150 °C

In conclusione si può affermare che è stato sviluppato uno strato intrinseco a base di ossido di silicio amorfo idrogenato ad alta gap. Utilizzando tale materiale come strato assorbitore in celle a singola giunzione p-i-n è stata misurata sul dispositivo una tensione massima di circuito aperto di 950 mV su substrato rugoso commerciale e superiore a 1 V su substrato flat. E' importante, inoltre, sottolineare che l'utilizzo di substrati ottimizzati per celle triple, di appropriati strati buffer alle interfacce e di strati drogati idonei, consentirà di migliorare ulteriormente i valori di V_{OC} e di riallineare i valori del FF a quello delle celle standard, rendendo maggiormente evidente le potenzialità del materiale sviluppato per l'applicazione in celle a tripla giunzione.

a.2 Sviluppo di riflettori posteriori per celle solari a film sottile di silicio

L'obiettivo del lavoro di ricerca è stato la progettazione e lo sviluppo di strati riflettori posteriori (da qui in avanti 'back-reflectors') per celle solari a film sottile di silicio, costituiti da cristalli fotonici ibridi metallo/dielettrici. L'applicazione di queste strutture alle celle solari è finalizzato ad incrementare l'intrappolamento della radiazione solare e di conseguenza a migliorarne l'efficienza.

Il lavoro di ricerca, svolto nell'ambito di un accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio, è la naturale prosecuzione di quanto già effettuato nelle passate annualità nell'ambito di analoghi accordi di collaborazione. Le attività 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/PAR2013/002.

La struttura della cella solare a film sottile di silicio analizzata (Figura 117) 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.

Per quanto riguarda la progettazione numerica dei back-reflectors, le simulazioni per il calcolo dell'assorbimento sono state condotte su modelli di celle solari che tenessero in conto dei vincoli reali di fabbricazione, sia in termini di proprietà fisiche dei materiali in gioco, sia delle tecniche e dei metodi di fabbricazione utilizzati. Lo studio numerico condotto nell'anno precedente ha rivelato come l'introduzione di un reticolo di diffrazione tra l'elettrodo superiore e la regione attiva garantisca un aumento di efficienza "ottica" (riferita all'assorbimento di luce nella regione attiva della cella) di circa il 20%

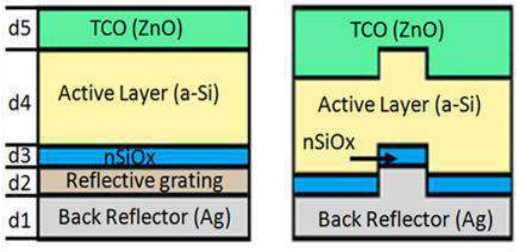


Figura 117. Schema delle celle analizzate

rispetto ad una configurazione in cui sia assente la strutturazione. L'attività sperimentale è stata, quindi, incentrata sulla nanostrutturazione del film di TCO, andando a nanostrutturare direttamente lo strato di ossido conduttivo, prima della deposizione degli strati costituenti la giunzione p-i-n.

Su queste basi, l'attività di ricerca si è focalizzata su tre punti principali descritti di seguito.

Studio di ottimizzazione dei tempi di scrittura di nanostrutture mediante Focused Ion Beam

Tale attività è finalizzata al superamento delle criticità (emerse nel corso delle attività degli anni precedenti) riguardanti la definizione mediante tecnologia Focused Ion Beam (FIB) delle nanostrutture su aree utili alla fabbricazione di celle solari, dell'ordine cioè di almeno 5 mm^2. La realizzazione di pattern con periodi di centinaia di nm su tali aree può, infatti, richiedere tempi di fabbricazione estremamente lunghi e proibitivi.

Il campione di vetro/ZnO è stato inserito nel FIB per la realizzazione del reticolo nanostrutturato. Il master di lavorazione è stato progettato con fori di larghezza di 180 nm, altezza di 300 nm e con periodo pari a 330 nm. Tramite FIB sono stati modificati i parametri di scrittura del fascio ionico in modo da realizzare tali strutture, cercando allo stesso tempo di minimizzare i tempi di lavorazione. Sono state eseguite numerose prove, modificando dose del fascio incidente e strategia di scansione e, contemporaneamente, valutando le condizioni di lavorazione migliori che permettessero una minore rideposizione del materiale rimosso a seguito del milling ionico. L'area di lavoro che ha consentito al FIB una buona risoluzione della nanostrutturazione è stata pari a 63 μm^2 per un totale di 576 fori. Quest'area è stata replicata 49 volte al fine di ottenere un'area totale di circa $3x10^3$ μm^2 per un tempo di lavorazione pari a circa 9 minuti. Il dispositivo è stato ultimato depositando la struttura in silicio e il contatto posteriore in argento. A causa delle dimensioni ridotte dell'area patternata, è stato possibile effettuare unicamente una caratterizzazione ottica che ha confermato la bontà della strutturazione realizzata.

Dall'insieme di prove effettuate, tuttavia, pur avendo ridotto il tempo di scrittura del singolo foro fino ad arrivare a circa 143 ms, non si è riusciti a superare la criticità già emersa nella scorsa annualità sull'impiego del FIB, poterlo, cioè, utilizzare per la nano-lavorazione di aree sufficientemente ampie da poter realizzare su di esse dei dispositivi sui quali effettuare una caratterizzazione completa.

Caratterizzazione di celle solari a film sottile fabbricate a partire da substrati patternati realizzati mediante tecnica di "replica molding"

Sulla base delle criticità emerse nella fase di scrittura via FIB, in parallelo alle attività descritte nel punto precedente, sono stati condotti esperimenti e caratterizzazioni di celle solari a film sottile costruite a partire da substrati fabbricati con tecnica "replica molding". La realizzazione dei substrati, con caratteristiche geometriche definite nella fase di analisi numerica, è stata commissionata ad un fornitore esterno (area dei substrati 5x10 cm^2). Sui substrati nanostrutturati sono state fabbricate celle solari di area pari a 1 cm^2 a singola giunzione p-i-n con uno strato assorbitore realizzato in silicio microcristallino, utilizzando due differenti spessori per lo strato assorbitore, 700 e 1500 nm. Analoghe celle sono state realizzate su substrati flat nello stesso run di deposizione per poter valutare gli effetti di intrappolamento della luce indotti dalla geometria presente sui substrati nanostruttati. Sulle strutture realizzate è stata condotta un'analisi sia morfologica che funzionale. L'analisi morfologica, effettuata mediante microscopio a forza atomica, disponibile presso i laboratori di Optoelettronica dell'Università del Sannio, ha riguardato i substrati prima e dopo la deposizione degli strati che formano la cella. Dall'analisi morfologica (Figura 118) si è sostanzialmente evinto che all'aumentare dello spessore di silicio depositato l'altezza del reticolo subisce un sensibile decremento (passando da 90 nm a 70 nm) e il rapporto tra il raggio dei fori e il periodo del reticolo (filling-factor) decresce con un effetto di restringimento dei fori del pattern (passando da 0,625 a circa 0,4 e 0,35 rispettivamente per le celle con 700 e 1500 nm di silicio depositato).

La successiva caratterizzazione funzionale è stata suddivisa in due fasi. Le strutture realizzate sono state infatti caratterizzate sia dal punto di vista prettamente ottico che elettrico. La prima caratterizzazione, effettuata presso i l'Università del Sannio, ha consentito di valutare gli spettri di riflettività (e quindi di assorbimento, essendo nulla la trasmissione in presenza di uno strato terminale di Ag sufficientemente spesso) e di confrontarli con quelli numerici attesi. L'accordo tra risultati numerici e sperimentali è risultato decisamente buono, e dimostra la validità del modello numerico adoperato (Figura 119). Le differenze tra gli spettri di riflettività sperimentali e quelli numerici (riguardanti perlopiù l'ampiezza delle risonanze eccitate) possono essere dovute principalmente ad imperfezioni intrinseche ai processi di fabbricazione.

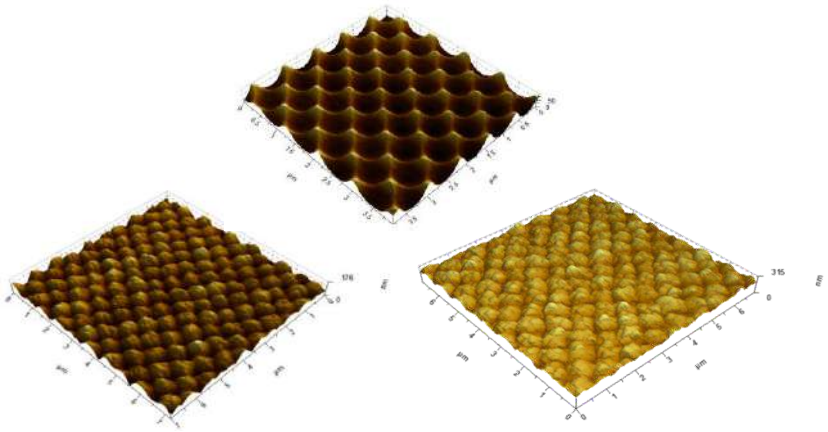


Figura 118. Immagine topografica 3D ottenuta tramite scansione dei substrati nanostrutturati realizzati per "replica molding" da fornitore esterno (in alto) e della superficie posteriore delle celle su di essi depositati con strato assorbitore in silicio microcristallino di spessore pari a 700 nm (in basso a sinistra) e 1500 nm (in basso a destra)

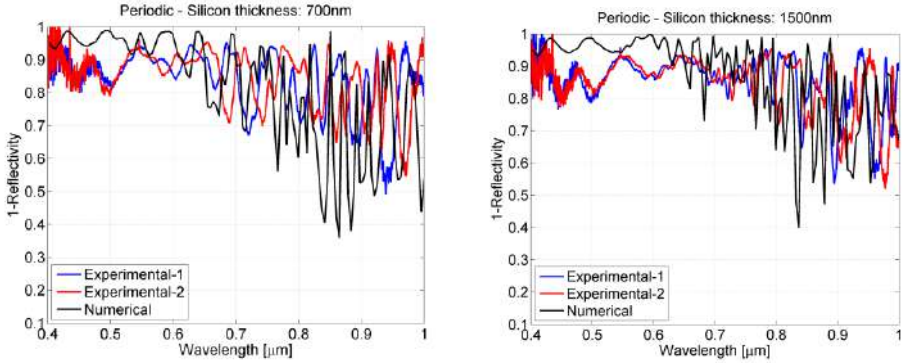


Figura 119. Spettri di assorbimento (1-riflettività) per le celle aventi spessore di silicio pari a 700 nm (a sinistra) e 1500 nm (a destra). Su ogni substrato sono state definite due celle (Experimental 1 e 2)

La caratterizzazione delle celle solari eseguita mediante misure di efficienza quantica esterna presso i laboratori ENEA ha consentito di valutare la reale efficacia dell'intrappolamento della luce ottenibile dai substrati nanostrutturati, tenendo conto anche degli effetti di raccolta delle cariche fotogenerate nei dispositivi. In Figura 120 sono quindi mostrate le EQE delle celle realizzate sui substrati nanostrutturati con strato assorbitore spesso 700 nm e 1500 nm. Per confronto sono anche riportate le EQE delle analoghe celle cresciute su substrati flat. In entrambi i casi è evidente il considerevole allargamento della curva della risposta spettrale ad alte lunghezze d'onda dovuto all'effetto di intrappolamento della radiazione solare per opera della nanostrutturazione presente sui substrati. I risultati ottenuti durante la caratterizzazione ottica e funzionale delle celle solari realizzate sono stati sfruttati per la fase di refining dei modelli numerici come descritto qui di seguito nel punto 3.

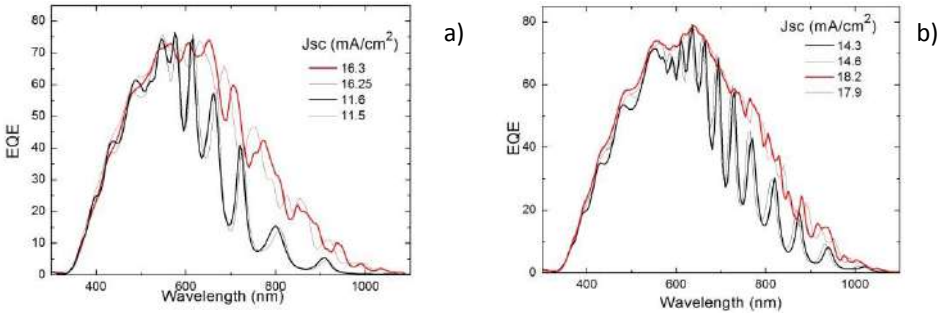


Figura 120. EQE di celle aventi spessore di silicio pari a 700 nm (a) e 1500 nm (b). Le curve rosse si riferiscono alle celle cresciute su substrati nanostrutturati, mentre quelle nere sono relative alle celle cresciute su substrati flat

Analisi numerica per lo studio di coerenza del modello numerico al caso reale

Il processo di fabbricazione della cella di tipo top-down prevede la deposizione di diversi strati a diverso spessore a partire dal substrato patternato che rappresenta il top della cella. Di conseguenza le caratteristiche geometriche del backreflector (spessore e filling factor) sono influenzate dalla conformità dei ricoprimenti rispetto al substrato di partenza. I risultati dell'analisi morfologica, descritta in precedenza,hanno permesso proprio di valutare l'effetto delle varie deposizioni sul substrato patternato e quindi lo shape del back-reflector.

Per quanto riguarda l'analisi numerica, dunque, si è proceduto con la definizione di un nuovo modello, caratterizzato da delle forme geometriche più realistiche, ossia effettivamente ottenute in seguito alla fabbricazione, che permettessero di raffinare il calcolo dell'assorbimento e migliorare l'aderenza dei risultati alla struttura reale. E' stato effettuato un confronto tra il modello ideale e quello realistico al fine di valutarne gli effetti sull'enhancement dell'assorbimento (Figura 121). Dai risultati si evince che effettivamente la tipologia di profilo incide molto sulla previsione di enhancement e nel caso di profilo realistico la previsione numerica coincide di fatto con le misure sperimentali sulle celle realizzate.

In conclusione si può affermare che il lavoro svolto sulla progettazione di back reflector per celle solari a film sottile di silicio ha evidenziato la necessità di tener conto delle morfologie reali ottenute nei processi di crescita dei vari strati al fine di ottimizzare la progettazione numerica delle strutture.

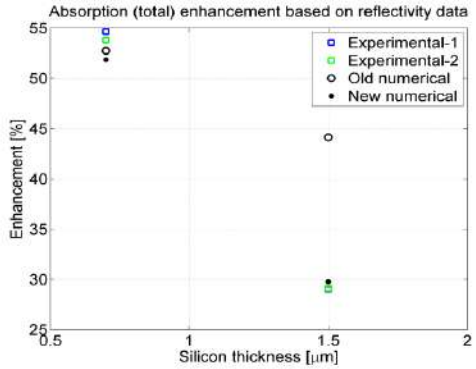


Figura 121 Enhancement in assorbimento (valutato come 1-riflettività) calcolato sugli spettri sperimentali e numerici con confronto tra vecchio e nuovo modello numerico

a.3 Sviluppo di substrati con elevate proprietà di scattering della radiazione solare

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di sviluppare tecniche per produrre substrati di vetro testurizzati con elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse in modo da aumentare l'assorbimento della radiazione solare nelle celle fotovoltaiche. Infatti, nell'ambito delle strategie per ottenere un efficace intrappolamento della radiazione solare, un metodo alternativo al consolidato utilizzo di TCO naturalmente testurizzato è l'utilizzo di un processo che operi direttamente sul substrato di vetro con la creazione di una superficie di adeguata rugosità sulla quale andare a depositare TCO molto sottili fabbricati con tecniche per larga area e di basso costo quali lo sputtering. Substrati da utilizzare come elettrodi frontali nel FV a film sottile di silicio sono allo stato attuale monopolio di una sola azienda (Asahi Glass Corporation), ne consegue l'assenza di un mercato competitivo che porti ad un abbassamento dei costi. Per questo motivo lo sviluppo di attività di ricerca finalizzate all'ottenimento di substrati testurizzati risulta strategico.

Per la testurizzazione dei vetri sono stati seguiti due differenti approcci:

- Aluminum Induced Texture
- Trattamenti di attacco chimico del vetro.

Nel seguito vengono sintetizzati i risultati conseguiti per entrambi gli approcci, mentre nei rapporti RdS/PAR2013/003 e RdS/PAR2013/004 sono contenuti i dettagli delle attività svolte.

Testurizzazione di substrati di vetro mediante tecnica Aluminium Induced Texture

Nella precedente annualità erano stati sviluppati substrati di vetro Corning del tipo Eagle XG con superficie testurizzata, utilizzando il metodo Aluminium Induced Texture (AIT). Seguendo le indicazioni derivanti dai risultati conseguiti, è stato condotto uno studio sistematico sul ruolo dei vari parametri coinvolti nel metodo AIT.

In particolare si è lavorato su differenti aspetti al fine di:

- ridurre le disuniformità di testurizzazione riscontrate;
- sviluppare nuovi e differenti trattamenti chimico-fisici post-annealing, utilizzando sia metodi chimici che chimico-fisici con tecniche quali il Reactive Ion Etching (RIE) in associazione alla tecnica AIT;
- sperimentare il metodo AIT sia su vetro Corning del tipo Eagle XG sia su vetri commerciali, quali i borosilicati, impiegati nella produzione di moduli fotovoltaici;
- ottimizzare le caratteristiche dei particolari superficiali (dimensioni, profondità, forma, angolo di scattering preferenziale delle cavità), studiando la relazione tra le geometrie di testurizzazione e le proprietà di scattering;
- migliorare complessivamente le prestazioni degli ossidi trasparenti e conduttivi, la cui deposizione sui vetri trattati con AIT è stata sperimentata sia mediante sputtering che mediante CVD.

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'Al ed i silicati del vetro:

$$4Al + 3SiO_2 \rightarrow 2Al_2O_3 + 3Si$$

I prodotti di reazione sono, infine, rimossi mediante etching chimico.

L'attività sperimentale per l'ottenimento di substrati di vetro testurizzati (Corning Eagle XG e Boroflat) è stata sviluppata attraverso più fasi:

1. Sviluppo di un vetro testurizzato ed ottimizzazione delle sue caratteristiche di rugosità superficiale con particolare riguardo ai seguenti aspetti:
   - ottimizzazione delle condizioni di deposizione dell'Al su vetro flat;
   - sviluppo di nuovi trattamenti di etching chimico o chimico-fisico post-annealing;
   - caratterizzazione della superficie risultante.
2. Deposizione di film di TCO sul lato testurizzato del vetro utilizzando differenti tecniche di deposizione: sputtering ed MOCVD.
3. Realizzazione di dispositivi fotovoltaici a film sottile su tale substrato (TCO/ textured glass).

La temperatura a cui è condotto il processo AIT (>600 °C) e l'elevata differenza tra i coefficienti di dilatazione termica di vetro e metallo inducono degli stress termo-meccanici che se da un lato contribuiscono alla diffusione dell'alluminio, dall'altro inducono una disuniformità macroscopica di testurizzazione (Figura 122a): le aree interessate dagli stress termici risultano meno attaccate, infatti in tali zone si misura una rugosità RMS di ~50 nm a differenza delle aree attaccate che hanno rugosità di ~90 nm. L'attività sperimentale condotta in questa annualità del progetto ha avuto come obiettivo la ricerca di soluzioni miranti a ridurre la disuniformità macroscopica di testurizzazione senza ledere la capacità di diffusione all'interfaccia.

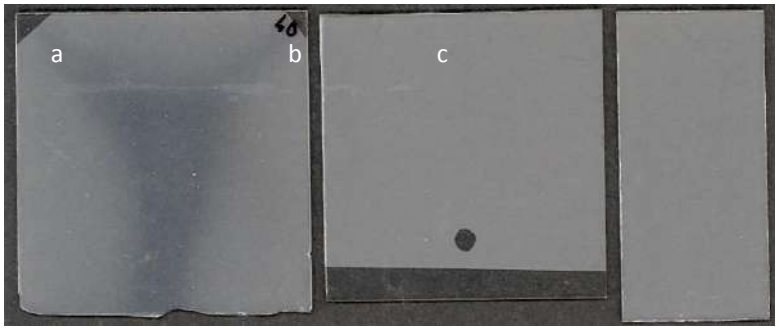


Figura 122 Immagine dell'aspetto dei substrati dopo processo AIT. Le superfici sono ottenute con: a) film di Al depositati a potenza di 3000 W e 15 mtorr, b) film di Al depositati a 2500 W e 4 mtorr, c) film di AlN

A tale scopo sono state investigate due possibili soluzioni: 1) depositare un layer di alluminio in opportune condizioni di potenza e pressione con stress intrinseco compressivo al fine di bilanciare gli stress tensili indotti durante l'annealing; 2) diminuire il mismatching termico testando nuovi materiali, diversi dall'Al ,con coefficienti di dilatazione termica tali da indurre stress controllati. A tale scopo sono stati depositati film di nitruro di alluminio

(AlN) mediante sputtering reattivo. Le variazioni strutturali verificatesi durante il trattamento AIT sono state analizzate mediante diffrazione ai raggi-X e confermano l'avvenuta reazione redox e la completa rimozione dei prodotti di reazione.

Entrambe le soluzioni si sono mostrate efficaci: le superfici non presentano linee di stress e mostrano una lattescenza uniforme (Figure 122b e 122c) indice di uniforme testurizzazione.

Nella precedente annualità del progetto di sviluppo del processo AIT, la rimozione dei prodotti di reazione post-annealing veniva effettuata utilizzando trattamenti in H_3PO_4 e successivamente con una miscela HF-HNO_3 della durata di circa 25 s. Questo processo richiede notevole esperienza per controllare la velocità di etching, rendendo, quindi, difficile lo scale-up industriale del processo. Infatti, per applicazioni su larga scala, l'etching aumenta la complessità del processo in quanto la miscela attacca sia i prodotti di reazione che il vetro a velocità molto alte. La finestra dei tempi di reazione è molto stretta, dell'ordine di 20-30 s; a 20 s l'etching può risultare incompleto con residui dei prodotti di reazione, mentre a 30 s può già smussare particolari della superficie adatti a produrre light-trapping.

E' stata, quindi, sviluppata una nuova procedura per la rimozione dei prodotti di reazione costituita da un attacco basico. Tale procedura consiste nell'immersione del vetro trattato termicamente in una soluzione di idrossido di sodio riscaldata a 70 °C per tempi che vanno da 5 a 15 min, tempo oltre il quale termina il gorgogliamento del processo di reazione. Successivamente il vetro viene trasferito nella soluzione di HF (5%) per tempi tra 3 e 5 min ed infine lavato con acqua deionizzata in ultrasuoni per consentire una totale rimozione dei residui di reazione prima di essere asciugato. L'NaOH non attacca il vetro a 70 °C e la soluzione di HF attacca il vetro a velocità molto basse. Sono state sperimentate soluzioni di NaOH a differente concentrazione (5%, 10% e 15% in peso) e per differenti tempi di trattamento (5, 7, 10 e 15 min). La morfologia risultante è stata confrontata con quella ottenuta con la stessa tipologia di substrati trattati con una soluzione concentrata di H_3PO_4. E' stato condotto uno studio sistematico sul ruolo dei vari parametri coinvolti nel processo di wet-etching. Le analisi risultanti sono state utilizzate per avere una migliore comprensione della correlazione tra i parametri del processo AIT e la risultante tessitura superficiale. I principali risultati ottenuti si possono riassumere come segue:

1) la concentrazione della soluzione di NaOH influenza sia l'entità della rimozione sia la rugosità: con concentrazioni del 5% si ha una rimozione incompleta, concentrazioni del 15% producono un appiattimento delle asperità;
2) la rimozione dei prodotti di reazione con NaOH è migliore rispetto al H_3PO_4: il processo è veloce e la rimozione è completa rispetto al trattamento in H_3PO_4, che lascia dei residui. Inoltre si ha il vantaggio di poter lavorare con soluzioni diluite anziché concentrate come nel caso dell' H_3PO_4;
3) all'aumentare dei tempi di attacco in HF si ha un cambiamento della dimensione delle cavità ed un appiattimento delle asperità. Le cavità diventano più grandi (Figura 123) e nello stesso tempo meno profonde, indicando che per tempi più alti l'HF rimuove particolari superficiali del vetro. Come conseguenza di ciò si ha una riduzione della rugosità e dell'Haze (definito come il rapporto tra trasmittanza diffusa e totale).

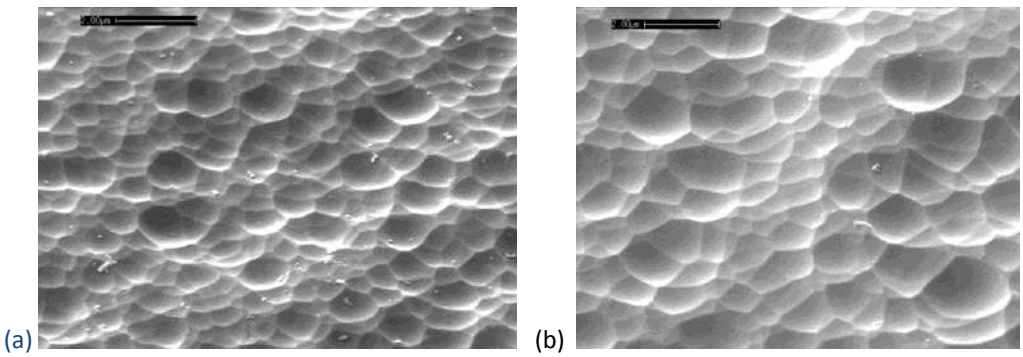


Figura 123. Immagini SEM della morfologia superficiale di vetri testurizzati con tecnica AIT. Effetto della durata dell'etching in HF: a) 3 min e b) 4 min

Individuato e fissato il trattamento con soluzione di NaOH al 10% per 10 min a 70 °C e di HF con durata di 4 min, sono stati effettuati ulteriori trattamenti in plasma di CF_4, mediante tecnica RIE, allo scopo di modificare in modo opportuno la topografia, la dimensione delle cavità e la riduzione delle asperità delle superfici. I trattamenti in RIE sono stati effettuati per tempi tra 8 e 20 min. L'analisi morfologica della superficie evidenzia un allargamento delle

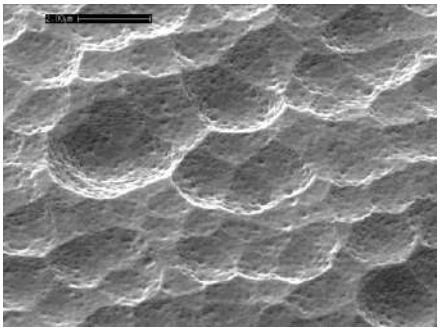


Figura 124. Particolare della morfologia superficiale di un substrato attaccato con RIE per 12 min

cavità (diametro medio: ~2,7 μm), uno smussamento degli spigoli e la comparsa di una seconda tessitura fatta di piccole cavità all'interno delle cavità grandi (Figura 124).

E' stata sviluppata una routine di calcolo che a partire dalle immagini AFM della morfologia superficiale dei vetri e dei film sottili di TCO permette di determinare i parametri statistici delle superfici: angolo di inclinazione medio, altezza delle cavità e dimensione media delle cavità.

A partire dai dati *raw* dell'immagine AFM, attraverso la loro discretizzazione in coordinate *x, y, z*, si è passati all'elaborazione numerica, mediante algoritmi di calcolo sviluppati in ambiente MATLAB, dei parametri statistici che caratterizzano la morfologia. Ogni elemento della matrice viene assunto con superficie planare. Determinando l'angolo di ogni micro-superficie dell'immagine AFM si ottiene l'istogramma della distribuzione degli angoli di inclinazione. Nella Figura 125 è riportata la distribuzione degli angoli di inclinazione di superfici di vetro testurizzate in differenti condizioni di trattamento post-annealing. E' stato confrontato l'effetto della durata dell'etching (3 e 4 min in HF), del tipo di attacco (HF o miscele HF-HNO_3) e di trattamenti RIE con CF_4 su vetri attaccati con HF per 4 min. I substrati trattati solamente con attacchi chimici presentano curve di distribuzione più ampie (curve con linea continua in Figura 125) con valori medi dell'angolo compresi tra 15-18°, dipendente dalla durata dell'attacco, e massimo del picco spostato verso valori più alti in campioni con rugosità più elevate. Gli angoli più alti, come è ragionevole aspettarsi, sono localizzati ai bordi dei crateri. Le superfici sottoposte ad attacco RIE successivo presentano percentuali di occorrenza più alte (curve tratteggiate in Figura 125), ma con un valore medio dell'angolo leggermente più basso (10-13°), questo indica che le cavità presenti in tali substrati sono

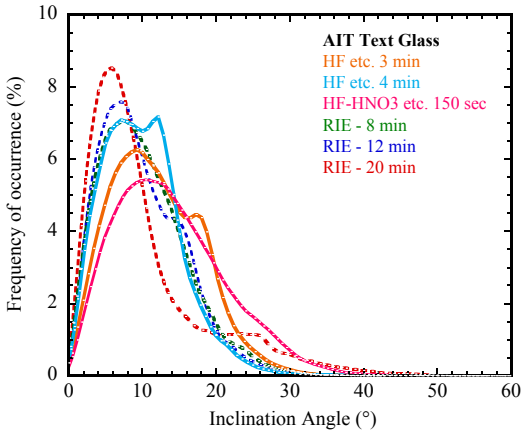


Figura 125. Istogramma della distribuzione degli angoli derivato dalle immagini AFM di vetri testurizzati con tecnica AIT per differenti trattamenti post-annealing

poco profonde. Campioni con più alta distribuzione angolare mostrano più alto haze ottico. E' ragionevole aspettarsi che superfici con angoli più elevati, e quindi con cavità più profonde, siano più adatte a produrre un miglior scattering della luce. I risultati ottenuti da questa analisi danno una migliore comprensione della correlazione tra i parametri del processo AIT e la risultante tessitura delle superfici.

Campioni di vetro trattati con metodo AIT sono stati ricoperti sul lato rugoso con un film di TCO costituito da ZnO:Ga (GZO) dello spessore di 900 nm mediante tecnica sputtering. Per la deposizione del GZO sono stati utilizzati vetri trattati con differenti processi di etching ed è stata comparata l'evoluzione delle proprietà dei layer. La rugosità e l'uniformità dei film di ossido di zinco è fortemente dipendente dalla morfologia del vetro sottostante e quindi dalla tipologia del trattamento subito da quest'ultimo. Ossidi depositati su vetri testurizzati aventi cavità più larghe presentano una rugosità inferiore, minore porosità e sono di spessore e morfologia più uniforme (Figura 126a). Superfici troppo rugose sono poco adatte all'utilizzo in celle solari. I campioni con solo trattamento chimico hanno una distribuzione angolare più ampia ed hanno anche un fattore di haze più alto (~35%) rispetto a quelli con distribuzione angolare più stretta (Figure 125 e 126b). I film di ZnO:Ga depositati su vetri rugosi hanno una sheet resistance di 13 ohm/sq ed una resistività di 9 x 10^{-4} Ωcm. La trasmittanza è superiore all'80%.

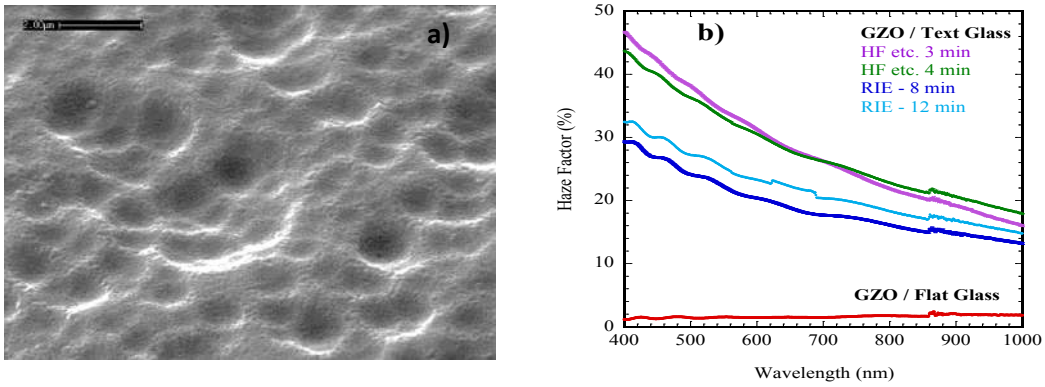


Figura 126. a) morfologia di un film di GZO/vetro text. e b) andamento del fattore di Haze delle superfici di GZO/vetro testurizzato con differenti trattamenti

Su vetro testurizzato tramite processo AIT sono state effettuate anche alcune deposizioni di ZnO:B (BZO) mediante tecnica MOCVD. La superficie mostra la presenza di strutture a doppia testurizzazione (Figura 127a). La rugosità RMS di queste superfici è circa 100 nm. Si registra un miglioramento dello scattering ad alte lunghezze d'onda con valori di haze sufficientemente alti (23 % ad 800 nm, Figura 127b). Le curve di scattering, ottenute mediante ARS (angular resolved scattering), dei film depositati su vetro rugoso mostrano un comportamento complesso con diversi picchi di scattering sia a basso che ad alto angolo. In particolare, sono presenti componenti di scattering a basse lunghezze d'onda dovute al contributo del vetro testurizzato sottostante, come evidente in Figura 127c.

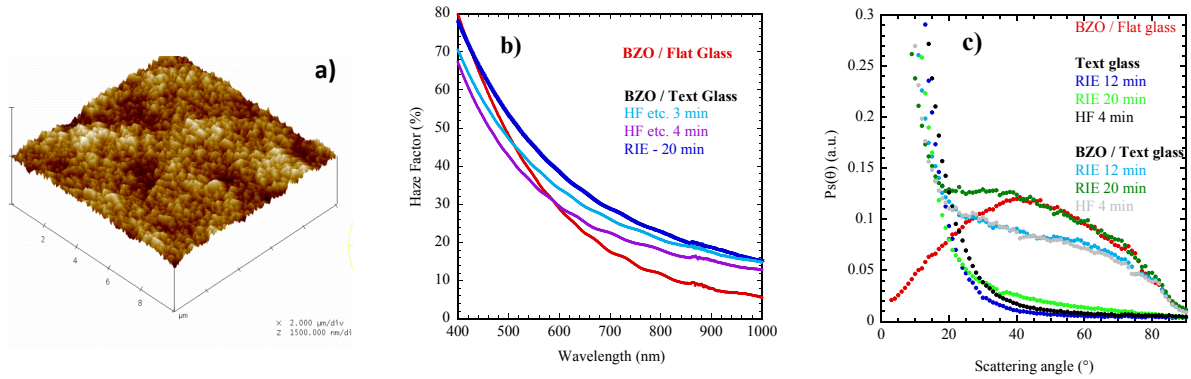


Figura 127. ZnO:B depositato per MOCVD su vetri testurizzati con differenti wet-eching: a) Immagine AFM della tipica morfologia superficiale, b) Fattore di Haze, c) curve di scattering risolto in angolo

Substrati con più elevato fattore di Haze hanno anche componenti di scattering ad angoli più alti. Gli scattering a più alto angolo sono quelli che contribuiscono altamente all'effetto di light trapping nel dispositivo. La struttura del vetro è in grado di indurre crescite complesse con caratteristiche ottiche interessanti che rendono questa struttura molto promettente. Ulteriori approfondimenti sono comunque auspicabili.

Allo scopo di valutare l'efficacia dei trattamenti condotti sul substrato di vetro, sono state realizzate celle solari in silicio amorfo, utilizzando substrati di vetro testurizzato ricoperti con elettrodo frontale di ZnO:Ga depositato mediante sputtering. Il dispositivo realizzato è costituito da una struttura p-i-n di spessore complessivo 0,30 µm e con back reflector in ZnO/Ag. Come mostrato in figura 128a, le celle depositate su vetro testurizzato mostrano una riflettanza emisferica (R_H) tra 400-650 nm significativamente più bassa (12,7%) di quella ottenuta nel caso di vetro con superficie flat, il cui valore medio è R_H = 29,7 %, indice di un migliore assorbimento della luce nel vetro testurizzato. Nella Figura 128b sono riportate a confronto le curve di efficienza quantica esterna (EQE) di un dispositivo realizzato su substrato di vetro flat e di un dispositivo realizzato su vetro con superficie rugosa: è evidente l'allargamento della curva EQE nel caso del substrato rugoso per effetto dell'intrappolamento della radiazione ottenuto sia grazie ad un light-scattering più efficiente della radiazione incidente sia per un efficace effetto antiriflesso. Confrontando il dispositivo cresciuto su substrato commerciale Asahi-U con quello cresciuto su GZO/Vetro Text, le curve di EQE hanno andamenti molto simili. Va inoltre notato che per $\lambda < 550$ nm la EQE ottenuta su vetro testurizzato è più alta di quella ottenuta per l'Asahi-U, indicando un miglior effetto antiriflesso ottenuto con il substrato GZO/Vetro testutizzato.

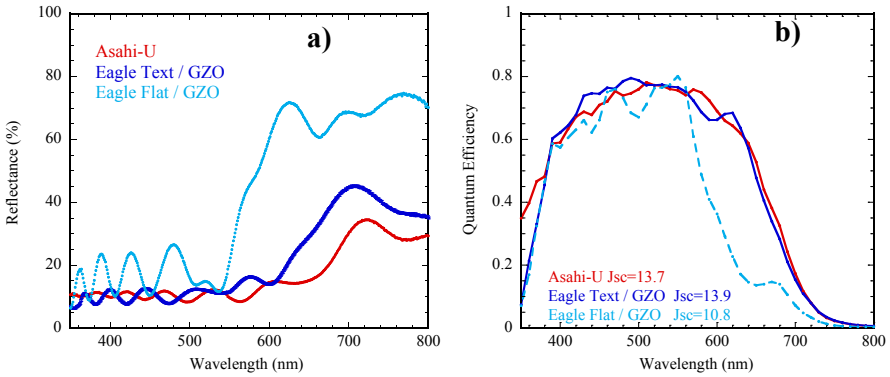


Figura 128. Confronto a) della riflettenza e b) della risposta spettrale misurate su celle di silicio amorfo realizzate su substrato con elettrodo frontale di GZO su vetro flat e su vetro testurizzato con metodo AIT. E' riportato il confronto con substrato commerciale di Asahi-U.

Questo risultato conferma che la tipologia di testurizzazione ottenuta è idonea ad indurre fenomeni di scattering della luce e che substrati di vetro testurizzati mediante tecnica AIT possono essere utilmente impiegati in dispositivi fotovoltaici.

Testurizzazione di substrati di vetro con metodi chimici

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università di Napoli Federico II hanno riguardato la messa a punto di un innovativo processo di testurizzazione di substrati vetrosi in grado di esibire, rispetto alle procedure attualmente in uso, caratteristiche di semplicità realizzativa e, al contempo, di economicità del processo complessivo. Le attività sperimentali sono state condotte in stretta collaborazione con il laboratorio Film Ottici Speciali del Centro ENEA di Portici. La procedura sviluppata prevede l'attacco chimico di substrati vetrosi, mediante soluzioni acquose di acido fluoridrico (HF) di opportuna composizione o di miscele di HF ed acido cloridrico (HCl), a temperatura ambiente. Si è reso necessario controllare la reattività dell'HF in relazione alla composizione chimica del substrato e della soluzione acida iniziale al fine di ottenere una velocità di attacco uniforme e riproducibile del substrato. Per garantire l'economicità del processo si sono utilizzati come substrati vetri commerciali tipo soda-lime impiegati nella produzione di moduli fotovoltaici. Si sono esplorate varie procedure di lavaggio sia in modalità statica che dinamica, e l'ottimizzazione della procedura ha previsto l'utilizzo combinato di detergenti e di una soluzione alcalina di NaOH di concentrazione pari a 0,75 M in modalità dinamica.

L'ottimizzazione dei parametri di attacco è avvenuta modulando la concentrazione della soluzione di HF e la sua composizione mediante l'aggiunta di additivi quali glicerina ed acido cloridrico, i tempi e la modalità di attacco. L'incremento del tempo di attacco produce un'omogeneizzazione della superficie testurizzata, come conseguenza della diminuzione dei valori medi di profondità di scavo ed aumento dei valori medi della larghezza dello scavo, sia a parità della concentrazione della soluzione di HF che della modalità di attacco. L'aggiunta di additivi quali la glicerina e l'acido cloridrico alla soluzione di HF migliora l'omogeneità dell'attacco, producendo una testurizzazione della superficie molto uniforme. A titolo di esempio in Figura 129 sono riportate le immagini SEM delle superfici testurizzate dei vetri denominati V15, V16 e V17, ottenuti utilizzando una soluzione di attacco preparata mescolando nel rapporto volumetrico 1:1 una soluzione di HF al 5% in peso e una soluzione di HCl al 5%

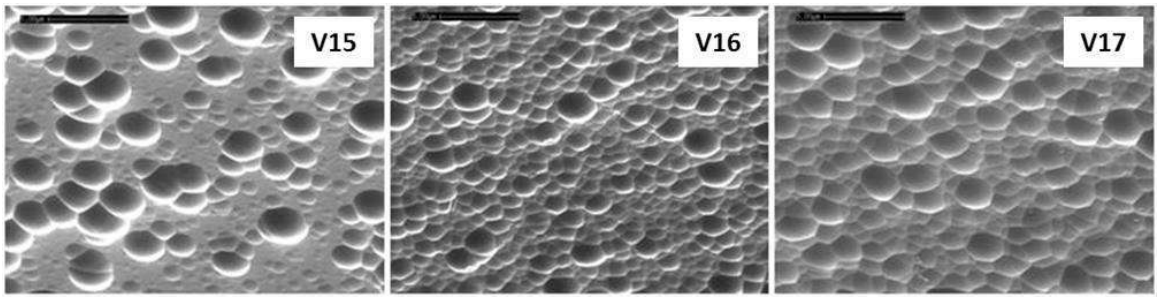


Figura 129. Immagini SEM della superficie testurizzata dei vetri V15, V16 e V17

in peso e differenti modalità e tempi di attacco. Infatti, i vetri V15 e V16 sono stati ottenuti utilizzando lo stesso tempo di attacco (4 min) ma una diversa modalità di lavaggio/attacco: per il vetro V15 sia il lavaggio che l'attacco sono avvenuti in ultrasuoni mentre per il vetro V16 si è utilizzata una modalità combinata con lavaggio in ultrasuoni ed attacco statico. I vetri V16 e V17 sono stati ottenuti utilizzando la stessa modalità di lavaggio/attacco combinata, ma due diversi tempi di attacco: 4 min (V16), 8 min (V17).

A parità del tempo di attacco l'incremento della concentrazione di HF produce un attacco meno selettivo che origina scavi con profondità medie inferiori e larghezze medie superiori. Al contrario, passando da una modalità di attacco dinamica (bagno ad ultrasuoni) a quella statica si ottiene un attacco molto più selettivo, a parità di concentrazione della soluzione di HF al 5 % in peso, caratterizzato da profondità di scavo maggiori e da larghezze medie di scavo inferiori.

Sono state realizzate diverse strutture TCO/vetro, depositando su alcuni dei vetri testurizzati con differenti modalità film di GZO di diverse caratteristiche ottiche ed elettriche mediante sputtering a radiofrequenza. La morfologia di una tipica superficie prima e dopo la deposizione del TCO è mostrata in Figura 130.

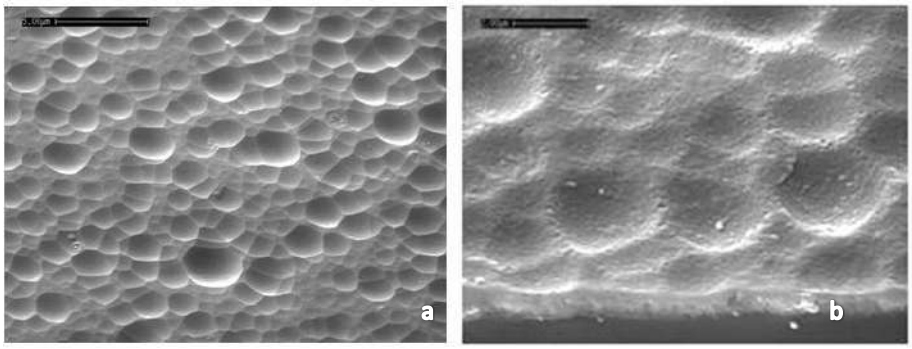


Figura 130. Immagini SEM della morfologia superficiale di un vetro testurizzato: a) prima e b) dopo la deposizione del film di GZO

La rugosità e l'uniformità dei film di GZO sono fortemente dipendenti dalla morfologia del vetro sottostante, mentre il diverso spessore dei film di TCO non sembra influenzare in modo significativo le caratteristiche ottiche ed elettriche delle strutture. Le strutture TCO/vetro che presentano le caratteristiche ottiche più interessanti sono quelle realizzate su vetri testurizzati caratterizzati da un elevato grado di uniformità piuttosto che da un elevato grado di disomogeneità dell'attacco. La misura di trasmittanza diffusa mostrata in Figura 131 per alcuni dei campioni realizzati evidenzia, infatti, che la capacità di diffondere la luce è più elevata per il campione V17 caratterizzato da una superficie molto uniforme (Figura 129).

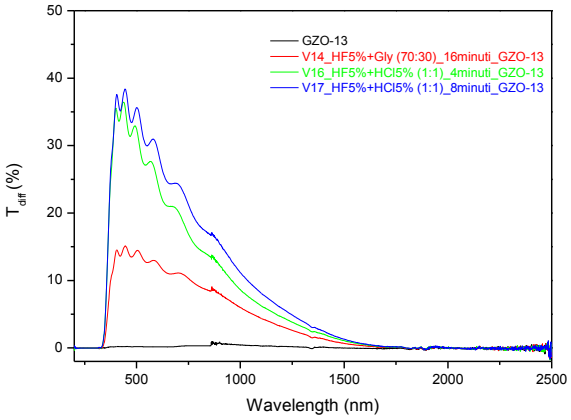


Figura 131. Spettri di trasmittanza diffusa (T_{diff}) di film GZO/vetro testurizzato ottenuti utilizzando i vetri di tipo V14, V16 e V17

I risultati finora ottenuti dimostrano che la procedura di testurizzazione proposta è in grado di produrre substrati testurizzati tali da indurre fenomeni efficaci di diffusione della luce nel dispositivo, sebbene il suo grado di ottimizzazione sia solo in una fase iniziale. Infatti esso può essere ampiamente implementato esplorando parametri di processo ed additivi diversi in una futura sperimentazione.

In conclusione si può affermare che il lavoro svolto è pienamente in linea con le previsioni iniziali e che tutti gli obiettivi previsti per la linea a sono stati raggiunti. E' stata dimostrata la possibilità di utilizzare film di ossido di silicio come strati assorbitori in celle a singola giunzione sulle quali è stata misurata una tensione di circuito aperto massima di 1 V. E' stato sviluppato un modello numerico per la progettazione di riflettori posteriori per celle solari a film sottile di silicio, testandolo su celle realizzate su substrati nanostrutturati. Il test ha evidenziato la necessità di effettuare un raffinamento del modello numerico, tenendo in considerazione le reali morfologie ottenute nei processi di crescita dei vari strati. Sono state indagate due differenti tecniche, Aluminum Induced Texture e attacco chimico, per sviluppare vetri testurizzati. Entrambe le tecniche sembrano essere

promettenti al fine di sviluppare elettrodi frontali ad alta efficacia di scattering ottico da utilizzare come substrati nell'industria del fotovoltaico a film sottile.

b. Celle a eterogiunzione a-Si/c-Si

Questa attività ha l'obiettivo di realizzare celle ad eterogiunzione in silicio basate su wafer sottili. Nel seguito sono analizzati i principali elementi critici della struttura del dispositivo (Figura 132) che attualmente ne limitano l'efficienza e ne viene quindi descritto sinteticamente il lavoro di ottimizzazione svolto presso i laboratori ENEA di Casaccia e di Portici. Il Dipartimento di Ingegneria Informatica, Elettronica e Telecomunicazioni dell'Università di Roma "La Sapienza" ha collaborato alle attività, curando, in particolare, la parte riguardante la deposizione di film sottili di ITO e la caratterizzazione dell'elettrodo frontale in termini di stabilità. Un approfondimento delle varie tematiche è riportato nei report RdS/PAR2013/005 e RdS/PAR2013/006.

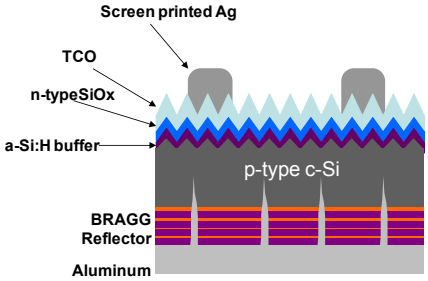


Figura 132. Architettura della cella solare ad eterogiunzione di silicio in esame

Contatto frontale: TCO e griglia di raccolta

Ottimizzazione dello strato di ITO

Sono stati condotti test per determinare le condizioni di deposizione di film sottili di Indium Tin Oxide (ITO) da impiegare nelle celle solari ad eterogiunzione, utilizzando un nuovo sistema di sputtering installato nei laboratori ENEA della Casaccia. In particolare sono state valutate le proprietà di resistività (ρ_{sheet}) e trasmittanza (T_{max}) dei film al variare della potenza del segnale a radio frequenza (RF) durante il processo di deposizione via sputtering, tenendo fissi gli altri parametri di deposizione quali: pressione di lavoro ($8x10^{-4}$ mbar) e temperatura nominale del substrato (250 °C). Inoltre i film di ITO sono stati sottoposti a un trattamento termico a 20 °C per 20 min per simulare le condizioni a cui dovrà resistere il film per i passaggi tecnologici successivi all'interno del processo di realizzazione delle celle solari. Al fine di ridurre l'eventuale danneggiamento del substrato durante la fase di sputtering dovuto al bombardamento degli ioni Ar è stato sperimentato anche un trasferimento di potenza del segnale RF in modo impulsato. In Figura 133 sono sintetizzate le caratteristiche di ρ_{sheet} e T_{max} di film di ITO realizzati in regime di potenza continua (sinistra) ed impulsata (destra). Considerando che il regime in continua produce film più trasparenti con conducibilità equiparabile alla deposizione in impulsata, per la deposizione di strati sottili di ITO sono state fissate le condizioni di deposizione come segue: potenza RF = 450 W, pressione di lavoro ($8x10^{-4}$ mbar), temperatura nominale del substrato (250 °C) e tasso di deposito = 4 nm/s.

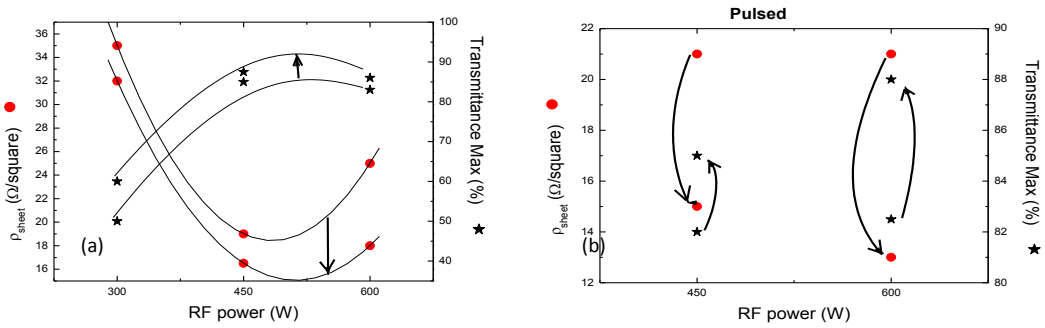


Figura 133. Valori di ρ_{sheet} e T_{max} dei film di ITO in funzione della potenza del segnale RF applicato in regime continuo (a) ed impulsato (b). Le frecce in nero sottolineano la variazione dei valori a seguito del trattamento termico a 200°C per 20 min

Analisi della struttura TCO/emitter

Sono stati valutati eventuali effetti di danneggiamento della eterogiunzione durante la realizzazione del contatto frontale, verificando se la deposizione del film di TCO via sputtering non provocasse un'indesiderata erosione del film amorfo sottostante, anche a partire da wafer di silicio con superfici testurizzate. Se ciò avvenisse potrebbe verificarsi una formazione di microshunt fra TCO e substrato di silicio, tali da ridurre fortemente l'efficienza delle celle solari. A questo proposito sono stati realizzati dei campioni di a-Si/c-Si, misurando gli spessori dei film depositati per via ottica prima e dopo la deposizione dello strato di TCO e valutando il tempo di vita dei portatori minoritari del bulk di silicio per verificare l'eventuale perdita di passivazione superficiale, determinata dal film amorfo, nel caso in cui esso venisse eroso dalla deposizione del TCO. Dal confronto fra modello numerico della misura di riflettanza e dati sperimentali, riportato in Figura 134, si è notato che gli spessori di amorfo non risultano essere erosi dalla deposizione di TCO, sia esso ITO oppure un doppio strato costituito da ZnO drogato alluminio e ITO (AZO/ITO), nemmeno nel caso di substrato testurizzato. Anche i valori di tempo di vita non subiscono alcuna riduzione. Un'ulteriore verifica è stata effettuata rimuovendo il TCO per via chimica selettiva in modo da non alterare lo strato amorfo. Gli spessori di a-Si sono risultati assolutamente identici a quelli misurati prima della deposizione di TCO.

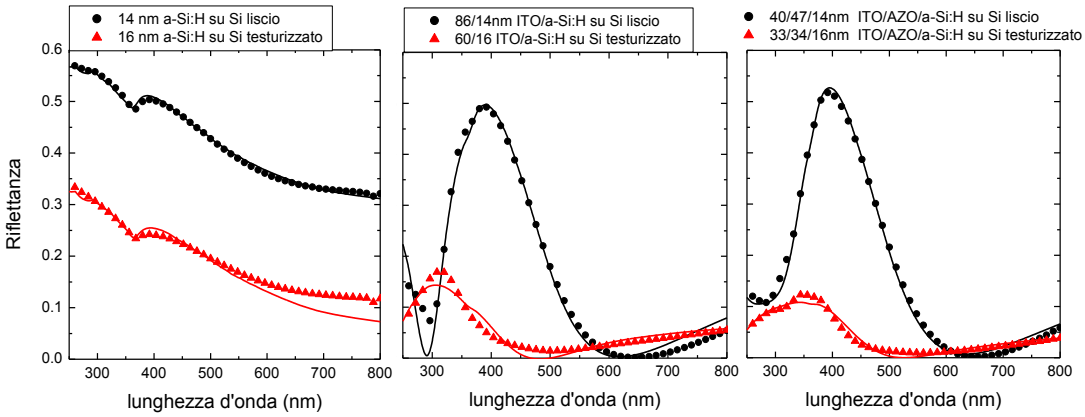


Figura 134. Riflettanze degli strati amorfi su silicio liscio e testurizzato misurate (punti) prima e dopo le deposizioni di TCO. Le curve continue rappresentano le simulazione delle riflettenze ottenute mediante un modello ottico numerico dell'equivalente struttura TCO/a-Si:H/c-Si. Nelle leggende sono indicati gli spessori desunti dal modello ottico della struttura in esame

E' stato condotto, inoltre, uno studio riguardo al contatto formato dai due tipi di TCO visti in precedenza (ITO ed ITO/AZO) su un emitter amorfo di tipo n, al fine di valutare l'eventuale formazione di una barriera indesiderata. Per questo motivo è stato depositato uno strato sottile di silicio amorfo di tipo n su vetro, dello spessore tipico (15 nm) di un emitter per cella solare ad eterogiunzione. Su questo film di n-a-Si sono stati depositati i due tipi di TCO, formando due elettrodi coplanari così da misurare la caratteristica I-V della struttura TCO/n-a-Si/TCO per verificare la bontà del contatto ohmico formato, sia appena deposto, che in seguito ad un trattamento termico di 170 °C per 30 minuti. La misura ha evidenziato una non linearità nel contatto fra ITO ed n-a-Si:H dovuto alla workfunction dello strato di ITO che non si allinea perfettamente con il livello di Fermi nell'n-a-Si:H, provocandone uno svuotamento con conseguente formazione di barriera. Quindi per basse tensioni, quelle di funzionamento della cella solare, il comportamento della giunzione ITO/n-a-Si:H non è perfettamente lineare. Viceversa il contatto ITO/AZO/n-a-Si:H è lineare sempre, ma con un valore di resistenza superiore. Il trattamento termico successivo, per i campioni di TCO/n-a-Si:H non altera le I-V appena osservate, conferendo un buon grado di stabilità al contatto elettrico. Utilizzando il contatto fra AZO ed n-a-Si:H è stata realizzata una cella ad eterogiunzione di prova che ancora risulta limitata dalla resistenza serie dei contatti elettrici.

Verifica di stabilità del contatto TCO/Ag serigrafico

Le proprietà elettriche ed ottiche dei film di TCO sono state valutate a seguito di trattamenti termici di temperatura e durata variabile, per simulare quanto avviene durante il processo di serigrafia che completa la metallizzazione delle celle. Poiché uno dei parametri principali che influenza il fill factor è la resistività specifica di contatto dell'argento sul TCO, sono stati condotti anche degli studi per osservare come si modifica tale parametro in funzione del tipo di pasta serigrafica utilizzata e del trattamento termico. A tal proposito è stata presa in considerazione la pasta Ag512EI fornita dalla Chimet SpA su specifica richiesta. A seguito di questi studi è emersa la necessità di ottenere film di ZnO meno resistivi. Sono stati pertanto depositati film di ZnO per sputtering,

utilizzando la scarica ad impulsi e ciò ha consentito di ottenere un materiale caratterizzato da una buona resistività ($6{,}7x10^{-4}$ Ωcm). Sono state inoltre apportate delle modifiche alla pasta di argento, introducendo una resina in quantità opportuna per favorire la stampabilità e l'adesione della pasta al substrato e, contemporaneamente, aumentando e differenziando il contenuto di argento in termini di tipo e granulometria per ridurne la resistività. L'ultima versione della pasta (AG512/10EI) ha una resistività molto vicina, seppure superiore, alla pasta originale (21,9 vs 17,3 μΩcm) e con essa è stata è stata valutata una resistenza di contatto fino a 0,15 $m\Omega \cdot cm^2$ sull'ITO, valore che può consentire di realizzare dispositivi ad alto FF.

Studio di strati passivanti ed applicazione alle celle solari

La funzione del sottile strato intrinseco tra il c-Si e l'emitter è quella di saturare i legami di silicio "appesi", detti comunemente "dangling bonds", che inevitabilmente si addensano sulla superficie di un wafer di c-Si. Tali legami insaturi rappresentano centri di ricombinazione per le cariche fotogenerate e questo si traduce in un abbassamento della tensione V_{OC} del dispositivo e quindi dell'efficienza stessa. La qualità della passivazione di tale strato è legata a vari fattori strutturali e chimici del film il cui controllo dipende a sua volta dai parametri di processo di deposizione, che nelle attività di seguito descritte è operato con tecnologia VHF PECVD (Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition). Si è condotto uno studio sistematico delle proprietà passivanti del silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) depositato a film sottile in varie condizioni di processo, variando in particolare la composizione dei gas di processo (silano, idrogeno) e la frequenza di eccitazione del plasma. Studi recenti infatti mostrano che la passivazione migliora quando la deposizione di a-Si:H avviene in condizioni prossime alla fase microcristallina, ad esempio con alte diluizioni di idrogeno, in quanto la maggiore concentrazione di idrogeno incorporato nel film comporta una maggiore densità superficiale di legami passivanti (Si-H) all'interfaccia a-Si/c-Si. La frequenza di plasma invece agisce sul bombardamento ionico dei radicali presenti nel plasma sulla superficie del film in crescita: a maggiore frequenza corrisponde un bombardamento più soft, che può comportare una struttura del film più ordinata e compatta all'interfaccia a-Si/c-Si. In alternativa allo strato intrinseco in a-Si:H si è anche condotto uno studio preliminare sulla passivazione con il più trasparente ossido di silicio amorfo (a-SiO_x:H) ottenuto in vari regimi di crescita.

La qualità della passivazione di a-Si:H e a-SiO_x:H è stata valutata mediante tecnica QSS PCD (Sinton Consulting, WCT-100) che misura il tempo di vita media dei portatori minoritari (τ_{eff}) in un wafer di c-Si sulle cui superfici viene depositato il materiale da caratterizzare. Nel nostro caso sono stati depositati su entrambe le superfici del wafer 15 nm del materiale sotto indagine. I campioni sono stati inoltre sottoposti a cicli di trattamenti termici (annealing) a 180 °C a valle dei quali si è misurato il lifetime allo scopo di valutarne l'evoluzione in funzione del tempo di annealing. In Tabella 49 sono riportate le misure di τ_{eff} per due set di campioni di a-Si:H depositati a 40 e 100 MHz su wafer p-type (FZ, 1-5 Ωcm, spessore 280 μm) ottenuti a quattro differenti rapporti di flussi di gas SiH_4/H_2: 20/20, 11/29, 8/32, 5/35. Le deposizioni sono state effettuate mantenendo fissa la temperatura di processo, la pressione e la potenza del segnale RF rispettivamente a T = 150 °C, p = 300 mtorr e P = 4 W in due camere distinte per frequenza di plasma. La prima riga relativa alle misure di τ_{eff} ne riporta i valori in μs per campioni senza trattamento termico (as-grown) e nelle successive quelli ottenuti con annealing la cui durata cumulativa è specificata nelle prima colonna.

Tabella 49. Valori di τ_{eff} iniziale e dopo annealing misurati su wafer p-c-Si passivati con a-Si:H depositato in diversi regimi

Frequenza (MHz)	100				40			
SiH_4/H_2	20/20	11/29	8/32	5/35	20/20	11/29	8/32	5/35
τ_{eff} (μs) iniziale	20	23	46	65	13	15	23	43
τ_{eff} (μs) +annealing 1h	248	394	612	868	200	300	350	158
τ_{eff} (μs) +annealing 2h	342	532	737	966	239	345	426	266
τ_{eff} (μs) +annealing 4h	453	730	894	1075	397	588	766	486
τ_{eff} (μs) +annealing 11h	462	867	896	889	435	623	885	233

Risulta evidente come il lifetime migliori con successivi step di annealing per tutti i campioni e che generalmente si osserva una migliore passivazione a frequenza di plasma di 100 MHz. Per i campioni as grown il miglior valore di τ_{eff} (65 μs) si ottiene a 100 MHz in alta diluizione (SiH_4/H_2 = 5/35). Sebbene tale valore non sia sufficiente per ottenere un dispositivo ad eterogiunzione ad alta efficienza, è interessante notare che un annealing di un'ora è sufficiente ad ottenere un lifetime ragionevole (868 μs). Bisogna, infatti, considerare che lo strato intrinseco è

comunque sottoposto ad annealing a temperature e durate comparabili durante il processo di realizzazione di una cella solare, dovuto ad esempio agli step di deposizione dei layer drogati ed al processo di screen printing per la griglia frontale di raccolta.

In tabella 50 sono riportate le misure di τ_{eff} relative ai campioni di a-SiO_x:H depositati su wafer di c-Si, utilizzando una miscela di gas SiH_4 + H_2 + CO_2. Si è proceduto ad una prima sperimentazione mantenendo fissi i flussi di SiH_4 e H_2, rispettivamente a 6 e 120 sccm, la pressione di processo a 500 mTorr, la temperatura a 150 °C e la frequenza di plasma a 40 MHz, mentre sono state utilizzate due diverse potenze del segnale RF (4 e 6 W) e due diversi flussi di CO_2 (1 e 3 sccm).

Tabella 50. Valori di τ_{eff} iniziale e dopo annealing misurati su wafer di p-c-Si passivato con a-SiO_x:H depositato in diversi regimi

Potenza RF (W)	**6**		**4**	
CO_2 (sccm)	**1**	**3**	**1**	**3**
τ_{eff} (µs) iniziale	216	10	82	3
τ_{eff} (µs) +annealing 1h	358	65	192	20
τ_{eff} (µs) +annealing 2h	611	63	356	24
τ_{eff} (µs) +annealing 4h	576	68	577	30

Un flusso maggiore di CO_2 induce una maggiore incorporazione di ossigeno nella struttura del film aumentandone la trasparenza, ma al contempo aumenta la difettosità del materiale peggiorando la qualità della passivazione, come si può notare dal confronto delle misure τ_{eff} ottenute per 1 e 3 sccm di CO_2. I migliori risultati si hanno con deposizioni operate a potenza RF di 6 W (τ_{eff} = 216 µs, as-grown).

Sono stati realizzati diversi dispositivi ad eterogiunzione allo scopo di valutare l'effetto dello strato intrinseco passivante in a-Si:H ed in a-SiO_x:H, soprattutto sul parametro V_{OC} e sull'efficienza, secondo le indicazioni fornite dallo studio precedentemente descritto. La struttura della cella è riportata in Figura 135a, nella quale il wafer di c-Si è dello stesso tipo di quello utilizzato per lo studio dei passivanti, ovvero FZ, <100>, p-type, di resistività 1-5 Ωcm e di spessore 280 µm. I wafer sono da 4 pollici di diametro e vengono desossidati in HF (soluzione al 2%) prima della deposizione. L'emitter in n-SiO_x sul front ed il layer p-a-Si:H sono depositati per PECVD in una camera dedicata del sistema di deposizione con spessore di 20 nm per entrambi. Il contatto posteriore si ottiene depositando 500 nm di argento per evaporazione e-gun mentre il contatto sul front prevede la deposizione di AZO per RF-sputtering e di una griglia di raccolta in alluminio, di spessore 5 µm, ottenuta per evaporazione e-gun con una maschera opportuna. Lo spessore dell'AZO è di 70 nm, ottimizzato per la sua funzione antiriflesso compatibilmente con un'accettabile resistenza di sheet (circa 140 Ω/sq). La griglia individua una singola cella di area di 6 cm^2 (Figura 135b) ed è possibile alloggiare un massimo di 4 celle sul wafer da 4 pollici.

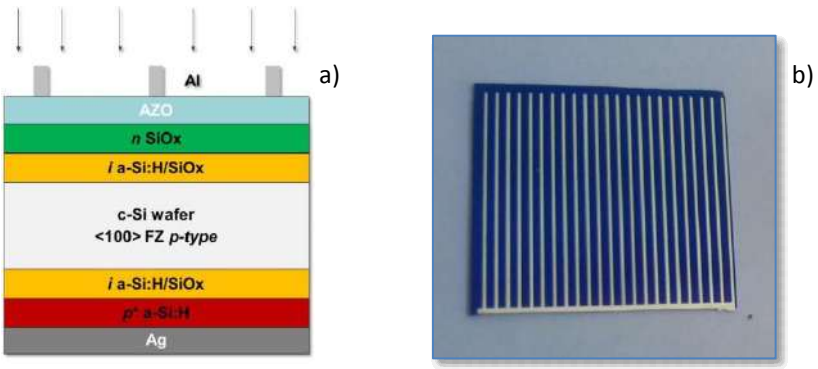


Figura 135. (a) Architettura e (b) immagine del dispositivo di test ad eterogiunzione

Bisogna puntualizzare che la griglia frontale di raccolta non è ottimizzata per il dispositivo in analisi e, quindi, la corrente e conseguentemente le efficienze sono sottostimate rispetto ai valori potenzialmente ottenibili a causa dell'alto ombreggiamento al quale sono sottoposti i dispositivi durante le caratterizzazioni. Nel seguito per alcuni dispositivi verrà pertanto fornito il valore di efficienza su area attiva, che tenga conto, cioè, del fattore di ombreggiamento.

Le celle ad eterogiunzione sono state caratterizzate misurando la caratteristica J-V mediante un simulatore solare (spettro AM1.5G): i parametri elettrici dei dispositivi più significativi sono riportati in Tabella 51.

Tabella 51. Parametri elettrici di dispositivi ad eterogiunzione ottenuti con vari strati passivanti

Cella	i-layer	Diluizione (sccm)	Eff (%)	FF (%)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	Rs (Ωcm^2)	Rsh (Ωcm^2)
PL4CL5	a-Si	11/29	15,4	73,0	32,8	644	1,4	1400
PL4CL6	a-Si*	11/29	7,5	35,5	29,6	714	38	1400
PL6CL10	a-SiOx	1 (CO_2)	15,2	78,5	31,5	615	1,1	13000
PL4CL11	a-Si	5/35	13,7	75,7	29,6	610	2,1	4200
PL4CL16	a-Si	20/20	9,4	53,0	28,9	613	8,9	13000

I layer intrinseci depositati per uno spessore di 5 nm, sia sul fronte che sul retro della cella, sono stati cresciuti nelle condizioni di processo per le quali si sono ottenuti i migliori lifetime per campioni as-grown: per a-Si:H si è operato a frequenza 100 MHz per vari rapporti di flusso SiH_4/H_2, mentre per a-SiO_x:H si è sperimentata la condizione ad 1 sccm di CO_2 con 6 W di potenza del segnale RF. Solo sulla cella PL4CL6 si è sperimentato un layer di 15 nm. La principale criticità emersa è legata alla estrema sottigliezza dei layer passivanti: la deposizione può avvenire per gran parte durante il transiente iniziale del processo stesso e questo può determinare per la passivazione un differente comportamento rispetto a quanto previsto dallo studio precedente, effettuato su campioni più spessi. Inoltre la successiva deposizione degli strati drogati può modificare le proprietà passivanti dello strato intrinseco. Ciò può spiegare, se si opera un confronto con la migliore cella (PL4CL5), sia la minore V_{OC} ottenuta nel caso della cella PL4CL11, per la quale sulla base della discussione precedente ci si sarebbe attesi una migliore V_{OC}, che la maggiore V_{OC} ottenuta con layer più spesso nella cella PL4CL6, quest'ultima di fatto caratterizzata da un'elevata resistenza serie che ne limita l'efficienza. La cella migliore in termini di prestazioni è la PL4CL5 sulla quale è stata valutata un'efficienza del 17,4 % su area attiva, tenendo cioè conto del fattore di ombreggiamento della griglia frontale. In Figura 136 è mostrato il confronto delle caratteristiche J-V delle due migliori celle (PL4CL5, PL6CL10) ottenute con layer in a-Si:H e a-SiO_x:H.

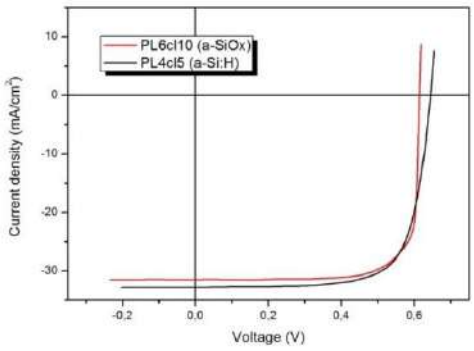


Figura 136. Caratteristiche J-V di dispositivi con layer intrinseco in a-Si:H e a-SiO_x:H

Dalle caratteristiche J-V si nota che la corrente risulta minore per la cella con a-SiO_x:H, risultato inatteso in quanto ci si aspetta che tale materiale sia più trasparente dell'a-Si:H e dovrebbe, quindi, introdurre un minor assorbimento della radiazione utile, incidente sul dispositivo. Da misure di efficienza quantica esterna riportate in Figura 137 si nota che effettivamente l'a-SiO_x:H è più trasparente in quanto la risposta spettrale è maggiore a lunghezze d'onda più corte, ma al contempo vi è una risposta minore per lunghezze d'onda maggiori, fenomeno che attualmente non è stato ben chiarito e che necessita di ulteriori approfondimenti.

La struttura ad eterogiunzione di test qui utilizzata non è ottimizzata per quanto riguarda i contatti front/back e non è, dunque, strutturata per alte efficienze. E' tuttavia possibile valutarne la potenzialità, a meno dell'effetto dei contatti, da misure di tensione *implied*-Voc (Voc_{im}), parametro direttamente legato alla distanza tra i quasi-livelli di Fermi degli elettroni e delle lacune e valutabile con tecnica di misura QSS-PCD su di una struttura mancante dei soli contatti finali sia frontali che posteriori. A tale scopo sono stati realizzati ulteriori dispositivi per i quali, a valle della deposizione dei vari layer per PECVD su di un intero wafer, una metà è stata destinata alla misura di Voc_{im} e l'altra è stata completata con i contatti. In Tabella 52 sono confrontate le misure di Voc_{im} e le relative V_{OC} misurate sui dispositivi finiti. Da tale confronto si nota come il contatto finale diminuisca la tensione di circuito

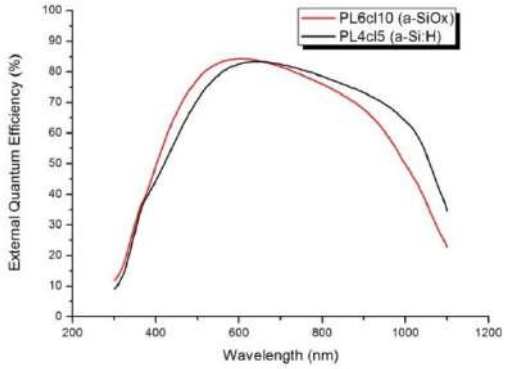


Figura 137. Efficienza quantica esterna per dispositivi con strato intrinseco in a-Si:H e a-SiO_x:H

aperto, a causa appunto di contatti non ottimizzati. Questo dato conferma, quindi, la possibilità di migliorare le prestazioni dei dispositivi fin qui sviluppati, agendo già solo sul contatto frontale e posteriore.

Tabella 52. Confronto tra implied-Voc e relative Voc misurate celle ad eterogiunzione realizzate con vari strato passivanti

Cella	i-layer	Diluizione (sccm)	Voc_{im} (mV)	Voc (mV)
PL4CL13	a-Si	5/35	**597**	580
PL6CL14	a-SiOx	1 (CO_2)	**620**	603
PL4CL15	a-Si	11/29	**674**	631

Si può concludere che gli obiettivi della linea b sono stati ottenuti parzialmente. Sebbene, infatti, non sia stato ottenuto un dispositivo con efficienza > 18% (deliverable previsto per questa attività), sono state individuate le criticità ed ottimizzati materiali e step di processo sia per la realizzazione del contatto frontale che per una corretta passivazione dell'interfaccia a-Si/c-Si. E' stato realizzato un dispositivo con efficienza del 17,4% su area attiva, che migliora il risultato della scorsa annualità nella quale l'efficienza massima ottenuta era stata pari a 15,8% su area attiva. Si sottolinea, inoltre, che l'architettura utilizzata per la realizzazione delle celle è potenzialmente esportabile per ottenere efficienze > 18% con dispositivi strutturati secondo lo schema di Figura 132 (wafer testurizzato, riflettore posteriore) e con contatti ottimizzati.

c. Celle a film sottili policristallini a base di Cu_2ZnSnS_4

L'utilizzo del Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) per la realizzazione di celle fotovoltaiche a film sottile è un argomento che sta raccogliendo un grandissimo interesse sia per la possibilità di sviluppare celle a film sottile con prestazioni analoghe a quelle del CIGS (efficienza >20%), ma senza utilizzare elementi rari, sia per la possibilità di realizzare celle tandem che possano superare il limite termodinamico del 30% imposto ai dispositivi basati su una singola giunzione.
La linea di ricerca è stata suddivisa in due subtask. Nel subtask c.1 le attività sono state dedicate al miglioramento dell'efficienza delle celle a giunzione singola, lavorando in particolare all'ottimizzazione della stechiometria del CZTS, allo studio dell'interazione del CZTS col substrato di molibdeno e al miglioramento della riproducibilità dei processi. L'attività di ricerca è stata svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento e con il Dipartimento di Fisica dell'Università "Sapienza" di Roma. La collaborazione con le Università è stata molto stretta ed ha riguardato anche tutte le attività sperimentali svolte nei laboratori ENEA. In particolare il Dipartimento di Fisica dell'Università "Sapienza" di Roma ha svolto gran parte della caratterizzazione ottica dei materiali e soprattutto ha provveduto ad effettuare nei propri laboratori le misure di fotoluminescenza e di spettroscopia Raman. L'Università di Trento ha invece svolto le attività di caratterizzazione strutturale tramite XRD di tutti i materiali utilizzati ed in più ha portato avanti autonomamente l'attività sulla deposizione CZTS da fase liquida.
Una seconda parte delle attività (Subtask c.2) è stata dedicata allo studio di materiali per dispositivi tandem CZTS/c-Si, che potrebbero in teoria raggiungere efficienze ben superiori al 30%. In particolare si è cercato di valutare quali materiali possano essere utilizzati per la costruzione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle.

Tutte le attività riportate nel seguito sono descritte con maggior dettaglio nei report RdS/PAR2013/007, RdS/PAR2013/008 e RdS/PAR2013/009.

Per quanto riguarda le attrezzature, le implementazioni delle strumentazioni effettuate nelle passate annualità hanno permesso un notevole miglioramento nel controllo della deposizione dei precursori, garantendo una buona riproducibilità dei film precursori. Tuttavia, il successivo trattamento di solforizzazione a cui vengono sottoposti i precursori (tipicamente effettuato in forno tubolare flussato in azoto) presenta ancora dei limiti in termini di riproducibilità dovuti all'impossibilità di fare un buon vuoto di pulizia preliminare e soprattutto allo scarso controllo sulla pressione dei vapori di zolfo ottenuti semplicemente riscaldando e vaporizzando una determinata quantità di zolfo insieme al campione in un volume confinato. È stato perciò avviato il processo che porterà alla realizzazione di un nuovo sistema sperimentale per il trattamento termico dei precursori in un'atmosfera di zolfo controllata. Lo zolfo verrà vaporizzato in una cameretta separata e controllata ad una temperatura indipendente

da quella del campione. In questo modo sarà possibile controllare il flusso, la pressione parziale e la permanenza dello zolfo nella camera di solforizzazione. Allo stato attuale la procedura di acquisto sta per essere finalizzata.

Un'ulteriore implementazione delle strumentazioni ha riguardato lo sputtering in linea della Kenosistec (acquisito nelle scorse annualità). Questo impianto, utilizzato per la deposizione dello ZnO intrinseco, dello ZnO:Al e del Mo, è stato implementato con l'aggiunta (marzo 2014) di un quarto catodo da utilizzare per la deposizione di ITO o di un metallo e di una camera di *load-lock*. Una foto del sistema nella nuova configurazione è riportata in Figura 138.

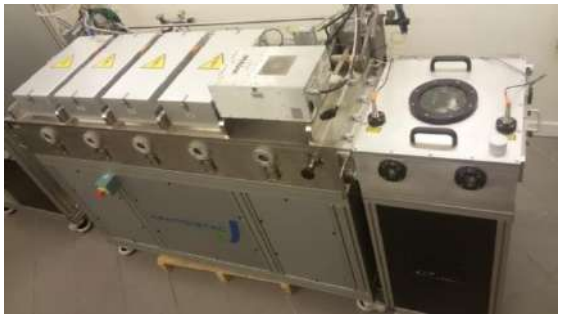


Figura 138. Impianto di sputtering della Kenosistec dopo l'upgrade

c.1 Sviluppo dei dispositivi a singola giunzione a base di Cu_2ZnSnS_4

Le attività svolte in questo substask hanno riguardato diversi aspetti che possono essere compresi in 3 punti principali: 1) studio dell'influenza di vari step e parametri di processo sulle prestazioni del dispositivo; 2) misure di fotoluminescenza sul CZTS per ottenere informazioni sul contenuto di difetti dei film; 3) crescita del CZTS da soluzioni di sali o sospensioni di nanoparticelle per valutare tecniche alternative e a basso costo di deposizione del materiale.

Studio dell'influenza di vari step e parametri di processo sulle prestazioni del dispositivo

Effetto del contenuto di zinco

I film di CZTS vengono cresciuti a partire da precursori depositati per *co-sputtering* di CuS, SnS e ZnS. Nella precedente annualità, dopo una prima ottimizzazione della stechiometria dei film di CZTS, è stato ottenuto un record di efficienza del 5,7%, ma misure di composizione hanno mostrato che il film di CZTS in questo dispositivo ha un contenuto di zinco eccessivo (Zn/Sn=1,8) rispetto al valore ottimale tipicamente riportato in letteratura (Zn/Sn=1,2). Sono stati, quindi, preparati dei precursori riducendo progressivamente la potenza di sputtering applicata al target di ZnS, in modo da ridurre il rapporto Zn/Sn rispetto ai vecchi campioni e cercando di mantenere un rapporto Cu/Sn di poco inferiore a 2. I film di CZTS cresciuti da questi precursori con meno zinco hanno mostrato un sensibile aumento della dimensione dei grani, come evidente dalla Figura 139 che a sinistra mostra l'immagine SEM della cella record e a destra quella ottenuta con i nuovi materiali.

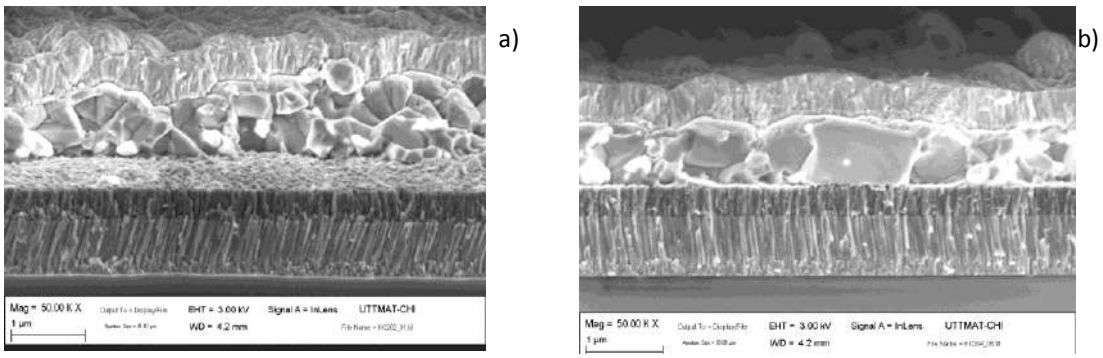


Figura 139. Immagine SEM della sezione di due celle in CZTS fabbricate da precursori ottenuti a P(ZnS)=200W (a) e P(ZnS)=160W (b)

Il miglioramento della morfologia con la riduzione di zinco si riflette in un aumento della J_{SC} dei dispositivi (fino a circa 18 mA/cm^2) e anche le misure di efficienza quantica, riportate in Figura 140 mostrano un miglioramento nella raccolta di carica nella regione dell'infrarosso, suggerendo una maggiore lunghezza di diffusione dei portatori minoritari.

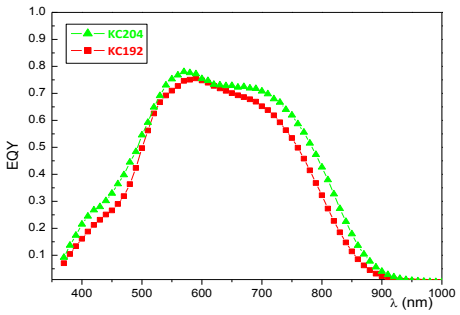


Figura 140. Efficienza quantica esterna del dispositivo record KC192, confrontato con la cella KC204 prodotta abbassando il rapporto Zn/Sn nel CZTS

Tuttavia, le prestazioni dei nuovi dispositivi risultano limitate da un basso valore della resistenza di shunt (500 Ωcm^2), che riduce sia la V_{OC} che il FF. Questo risultato è dovuto a gravi problemi di adesione dei nuovi materiali sui substrati di molibdeno: un esempio è mostrato nella Figura 141 che mostra chiaramente un effetto di *blistering* nel film di CZTS. A causa della formazione di bolle, la maggior parte dei dispositivi realizzati usando questi materiali hanno una bassa resistenza di *shunt* (R_{sh}) ed è, inoltre, difficile individuare delle zone idonee per la realizzazione della cella.

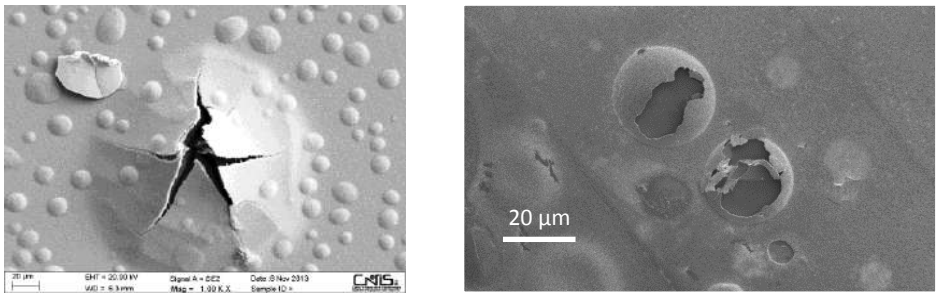


Figura 141 Immagine SEM della superficie di un tipico campione di CZTS affetto da *blistering*

Blistering nei film di CZTS

Il fenomeno del *blistering* è stato riportato spesso in letteratura e viene attribuito o ad un forte stress compressivo del film, accoppiato ad una adesione al substrato non sufficientemente buona, oppure alla formazione di gas all'interfaccia film/substrato.

Alcune considerazioni dettagliate contenute nel rapporto RdS/PAR2013/007 mostrano però che questa seconda ipotesi nel caso in esame è da scartare. Le bolle perciò si formano come conseguenza di una scarsa adesione al substrato e dello stress compressivo del film la cui causa non è chiara. Esso, forse, potrebbe dipendere dalla crescita di grani particolarmente grandi, evidenziata al SEM per campioni con più basso contenuto di zinco, che comprimono il film nel loro intorno.

La causa del fenomeno del *blistering* potrebbe anche essere la differenza del coefficiente di espansione termica tra CZTS e molibdeno. Per valutare questa ipotesi bisogna conoscere l'entità dello stress che induce il *blistering* e quello derivante dai diversi coefficienti di espansione termica. I metodi ed i calcoli per valutare queste grandezze sono contenuti nel rapporto esteso. Da tali valutazioni appare che lo stress meccanico nei nostri film (e quindi il *blistering*) non può derivare solamente dall'espansione termica. E' probabile che lo stress sia in larga parte già presente nel precursore e derivi dalle condizioni di sputtering. Questa ipotesi è supportata dal fatto che spesso il precursore si delamina dai substrati di vetro non ricoperti di molibdeno poco dopo la loro estrazione dal sistema di deposizione.

Da queste considerazioni deriva che ci sono due strade per eliminare il fenomeno del *blistering*: 1) ridurre lo stress compressivo nel precursore e 2) migliorare l'adesione col substrato interponendo un opportuno layer tra CZTS e molibdeno.

1. Deposizione di precursori a pressione maggiore

Uno dei modi per ridurre lo stress compressivo nel precursore è quello di depositarlo ad una pressione maggiore. L'aumento della pressione di sputtering porta infatti ad una riduzione dell'energia media delle specie incidenti e

quindi nella maggior parte dei casi ad una riduzione dello stress compressivo. Si è quindi provato ad utilizzare una pressione di Ar di 10^{-2} mbar invece dei soliti $3x10^{-3}$ mbar. In effetti i campioni di CZTS ottenuti da questi precursori hanno mostrato una buona adesione sia su vetro che su molibdeno, dove non si è più osservato il fenomeno del *blistering*. Si è provato ad ottimizzare la stechiometria dei nuovi materiali, utilizzando sei diverse combinazioni di potenze di sputtering e controllando le prestazioni finali dei dispositivi.

La cella migliore di questa serie ha un'efficienza del 4,3% ed una J_{SC} di 12,5 mA/cm^2 senza antiriflesso. In effetti tutte le celle ottenute a partire da precursori depositati a 10^{-2} mbar mostrano J_{SC} più basse rispetto a quelle dei migliori dispositivi ottenuti da precursori depositati a più bassa pressione. A parità di solforizzazione, le dimensioni dei grani nei campioni ad alta pressione risultano tipicamente inferiori di quelle dei campioni depositati a $3x10^{-3}$ mbar e questo potrebbe spiegare la riduzione di corrente di corto circuito.

2. Miglioramento dell'interfaccia CZTS/Mo

Un primo tentativo per evitare la formazione di bolle nei campioni con basso contenuto di zinco è stato quello di introdurre un buffer di ZnS. Lo ZnS è un materiale con la stessa struttura del CZTS, ma con un'energia di formazione sufficientemente alta che lo rende perfettamente stabile a contatto con il molibdeno. L'idea è quindi che lo ZnS impedisca al molibdeno di sottrarre lo zolfo al CZTS nelle fasi iniziali della solforizzazione per poi trasformarsi in CZTS grazie all'interdiffusione dei metalli. Una minore reattività interfacciale potrebbe ridurre la formazione di *voids* e fasi spurie all'interfaccia, migliorando l'adesione. In effetti l'introduzione di un buffer di ZnS sufficientemente spesso sul molibdeno elimina il fenomeno del *blistering,* ma la cella farealizzata in questo modo ha mostrato un peggioramento dell'efficienza (4,1%) rispetto a quella ottenuta senza buffer layer (5,3%). Il peggioramento dipende da una riduzione del fill factor (da 51 a 44%). La resistenza serie rimane bassa (Rs circa 2 Ω cm^2), ma il fit della curva J-V di buio suggerisce la presenza di una giunzione parassita sul contatto posteriore.

Visto che lo ZnS peggiora in maniera sensibile il contatto ohmico posteriore, si è provato ad utilizzare invece uno strato di ZnO intrinseco di circa 10 nm. Anche questo materiale si è dimostrato capace di prevenire i problemi di adesione all'interfaccia CZTS/Mo. I campioni di CZTS depositati in condizioni analoghe a quelle del materiale record (P_{ZnS}=200 W), ma utilizzando il buffer di ZnO, hanno permesso di ottenere le stesse efficienze (circa 5,7%), dimostrando così che lo strato di ZnO non peggiora le prestazioni del dispositivo. Tuttavia, l'introduzione di questo buffer non ha permesso di ottenere i miglioramenti sperati utilizzando i campioni depositati a potenza ridotta (P_{ZnS}=160 W). Infatti, pur migliorando l'adesione dei film e riducendo la resistenza di shunt, la V_{OC} rimane bassa non consentendo di migliorare in maniera significativa il valore di efficienza (Tabella 53).

Tabella 53.Confronto tra due coppie di celle che differiscono per la presenza dello strato di ZnO

Cella	Substrato	P_{RF}[ZnS] (W)	V_{OC} (mV)	J_{SC} (mAcm^{-2})	FF (%)	J_0 (μAcm^{-2})	n	Rs (Ωcm^2)	Rsh (Ωcm^2)	Eff (%)
KC192	SLG/Mo	200	629	15,23	59,2	0,12	2,2	1,5	1,9E+04	**5,68**
KC240	SLG/Mo/ZnO	200	645	15,26	57,2	0,07	2,2	2,5	6,7E+03	**5,62**
KC204	SLG/Mo	160	583	17,87	50,7	6,8	3,15	1,8	5,0E+02	**5,28**
KC275	SLG/Mo/ZnO	160	591	16,23	49,4	0,14	2,16	3	1,8E+04	**4,74**

Studio dell'effetto della stechiometria mediante campioni a composizione variabile

Uno studio più rapido degli effetti della stechiometria sulle prestazioni dei dispositivi è stato effettuato realizzando e misurando degli array di dispositivi fotovoltaici caratterizzati da materiali con stechiometrie diverse. Queste matrici di dispositivi sono state realizzate a partire da film sottili a composizione variabile sulla superficie del campione. I film vengono in genere cresciuti depositando CuS, SnS, e ZnS per sputtering simultaneo su un substrato rotante: la rotazione consente una maggiore omogeneità di deposizione sull'intera area del substrato Questi film, invece, sono stati cresciuti bloccando la rotazione del substrato: in questo modo si ottengono dei film con composizione graduale conseguente all'arricchimento vicino ad ogni target del metallo corrispondente. Le immagini relative ai campioni sono riportate tenendo sempre l'angolo vicino all'SnS in alto a sinistra, quello vicino allo ZnS in alto a destra e quello vicino al CuS in basso a destra (Figura 142). Questi film a composizione variabile sono stati processati in maniera da ottenere una matrice 24x24 di dispositivi fotovoltaici di area 3x3 mm^2 e di stechiometria diversa.

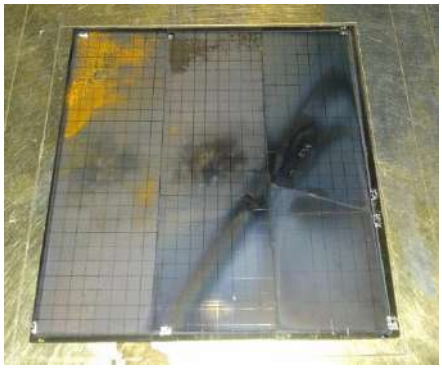


Figura 142. Matrice 24x24 di celle solari in CZTS con area 3x3 mm^2 e con stechiometria diversa. La striscia diagonale più scura corrisponde alla zona in cui [Cu]/[Sn]=2. La colorazione gialla nell'angolo in alto a sinistra è dovuta alla crescita di CdS colloidale nella regione ricca in stagno

Dalle misure EDX di composizione risulta che la striscia diagonale ben visibile nel campione per il colore più scuro (Figura 142) corrisponde al materiale con un rapporto [Cu]/[Sn] vicino a 2. Questa zona generalmente presenta anche una migliore morfologia nel senso di una minore probabilità di avere *blistering* e quindi buchi.

Sono state realizzate e misurate 8 mappe statiche variando potenza di sputtering, pressione, temperatura e tipo di superficie del substrato. Sono state poi misurate le V_{OC} e le J_{SC} delle celle appartenenti alle zone in cui il funzionamento era accettabile. Per alcune celle in ogni mappa sono state effettuate anche misure dettagliate della caratteristica I-V sotto illuminazione AM1.5g e al buio e di efficienza quantica esterna. Infine su alcuni di questi dispositivi sono state effettuate, all'Università Sapienza di Roma, delle misure di fotoluminescenza per valutare una possibile correlazione tra la posizione in energia del picco principale dello spettro e le prestazioni del dispositivo. I risultati dettagliati di questa indagine sono riportati nel rapporto esteso. In questa sintesi riportiamo solo un esempio delle mappe di V_{OC} e di J_{SC} misurate su uno di questi campioni (Figura 143).

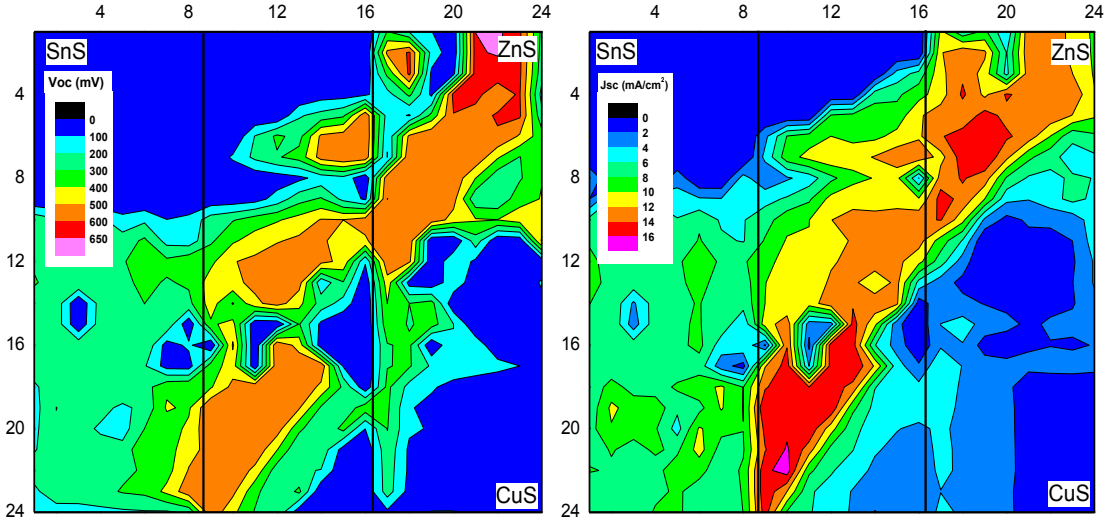


Figura 143. Mappa delle tensioni a circuito aperto (V_{OC} in mV) e della corrente di cortocircuito (J_{SC} in mA/cm^2) delle celle. Sui tre angoli è riportato il materiale

In entrambe le mappe (V_{OC} e J_{SC}) è evidente che, allontanandosi dalla diagonale verso la regione con [Cu]/[Sn]>2, si ottengono dispositivi con V_{OC} e J_{SC} vicini a zero, nonostante i dispositivi appaiano morfologicamente perfetti. Questo comportamento viene osservato sistematicamente in tutte le otto mappe. Le mappe confermano anche che i migliori valori di J_{SC} sono ottenuti vicino alla diagonale ([Cu]/[Sn]=2), ma nella zona caratterizzata da un basso contenuto di zinco ([Zn]/([Cu]+[Sn])≈0,35), mentre i valori migliori di V_{OC} si trovano sempre vicino alla diagonale ma nella zona caratterizzata da un alto contenuto di zinco ([Zn]/([Cu]+[Sn])≈0,7).

In definitiva dalla correlazione tra la stechiometria del CZTS e le prestazioni del dispositivo si evince che il ruolo della stessa stechiometria non è poi così critico e che bisogna soprattutto stare attenti a mantenere sempre un rapporto [Cu]/[Sn] minore di 2. Inoltre le prestazioni dei dispositivi non dipendono solo alla qualità dei grani che

costituiscono il materiale: stress meccanico, morfologia e composizione chimica delle due interfacce del film sono altrettanto importanti. Una migliore comprensione del loro ruolo ed un loro migliore controllo possono sicuramente ampliare molto l'intervallo delle composizioni adatte alla realizzazione di dispositivi di alta efficienza.

Misure di fotoluminescenza su film di CZTS

Per ottenere delle informazioni sul contenuto di difetti dei nostri materiali abbiamo effettuato delle misure di fotoluminescenza (PL). In questa sintesi riportiamo solo alcune misure effettuate su un campione tipico (K515b) cresciuto a bassa pressione ($3x10^{-3}$ mbar) su di un substrato vetro/Molibdeno/ZnO con P_{RF}(ZnS)=160 W. Le misure di fotoluminescenza sono state ottenute eccitando i campioni con luce a 532 nm. Lo spettro di luminescenza presenta un unico picco abbastanza largo con il massimo a circa 1.25 eV (Figura 144). Il picco è asimmetrico e la sua forma è ben riprodotta dalla sovrapposizione di due gaussiane. La posizione del massimo si sposta verso energie maggiori (blue-shift) all'aumentare della potenza di eccitazione.

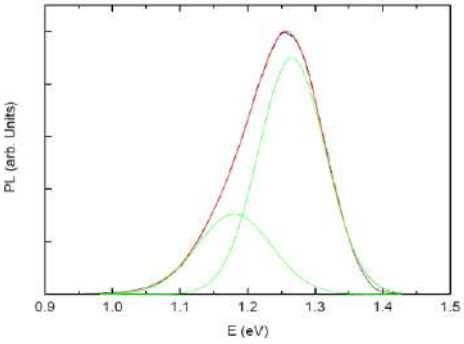


Figura 144. Spettro PL del campione K515b a T=10 K, con densità di potenza di eccitazione P ~15 Wcm^{-2}

La dipendenza dell'energia e dell'intensità delle due componenti del picco della banda di PL dalla potenza di eccitazione è mostrata in Figura 145. Il blue-shift è abbastanza accentuato (circa 10 meV per decade) e l'intensità dipende linearmente dall'eccitazione fino a 1 mW per poi iniziare a saturare.

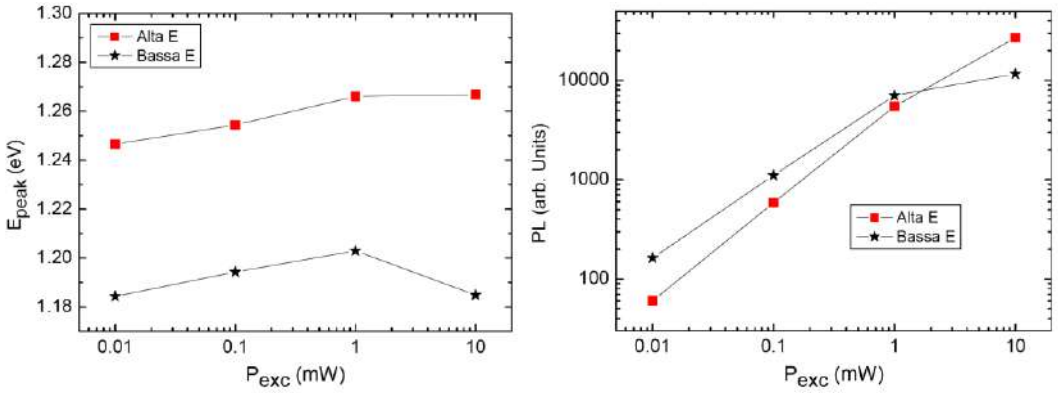


Figura 145. Dipendenza dell'energia e dell'intensità delle due componenti del picco di fotoluminescenza all'intensità di eccitazione

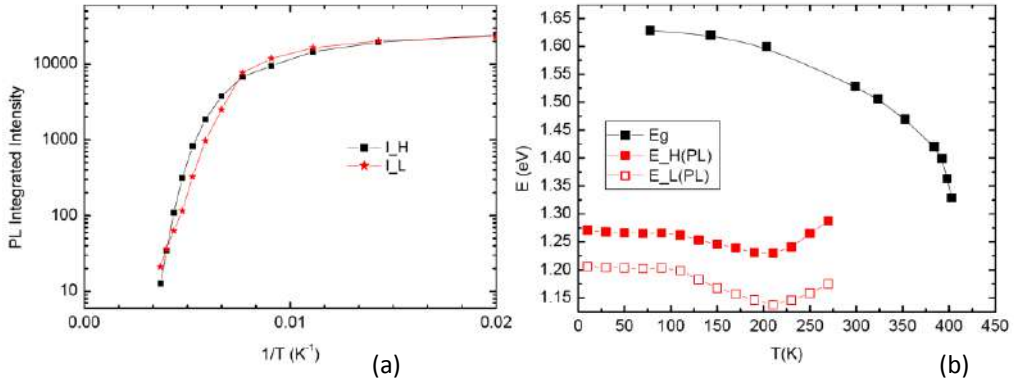


Figura 146. Andamento dell'intensità integrata delle due componenti dello spettro della PL in funzione di 1/T (a). Andamento con la temperatura della gap del CZTS e delle due componenti del picco della fotoluminescenza (b)

In Figura 146a è riportato l'andamento dell'integrale delle due componenti della banda di PL in funzione di 1/T. Nella Figura 146b viene mostrata la dipendenza della posizione del picco delle due componenti di PL dalla temperatura e viene messa a confronto con l'analoga dipendenza dell'energia della banda proibita riportata in letteratura. Fino a 200 K lo spostamento segue fedelmente quello della banda proibita del materiale.

Infine riportiamo in Figura 147 un confronto tra la forma della banda di PL (sia a 10 K che a 270 K) e il coefficiente di assorbimento dello stesso materiale, come ricavato dalla risposta spettrale di una cella fotovoltaica realizzata con lo stesso film di CZTS.

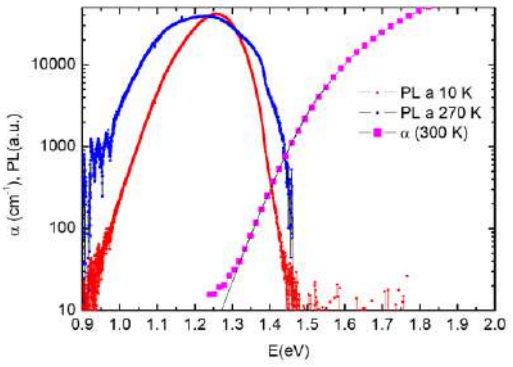


Figura 147. Confronto tra gli spettri di fotoluminescenza e di assorbimento di un film di CZTS (K515)

Lo Stokes-shift, ossia lo spostamento verso le basse energie del picco di PL rispetto alla soglia di assorbimento è di circa 0,30 eV, a conferma della presenza di una consistente densità di stati localizzati nel materiale. Anche la forma della soglia del coefficiente di assorbimento indica la presenza di un continuo di stati al di sotto degli estremi della banda di conduzione e/o di valenza (code di banda) derivante, ad esempio, dalle fluttuazioni di potenziale indotte dalla presenza di donori e accettori carichi o da fluttuazioni nella composizione, fenomeno più che probabile in un quaternario.

L'interpretazione di queste misure è particolarmente complessa e viene discussa in dettaglio nella relazione estesa RdS/PAR2013/008. Con i dati a disposizione non sembra possibile decidere se la luminescenza vada attribuita a transizioni donore-accettore o a transizioni tra livelli di difetto e le code di banda anche se quest'ultima ipotesi sembra più probabile. Comunque per riprodurre le caratteristiche fondamentali dei dati sperimentali, entrambi i modelli devono presupporre l'esistenza di una densità di difetti molto alta (dell'ordine di 10^{19} cm^{-3}) e che il materiale sia fortemente compensato.

Crescita del CZTS da soluzioni o dispersioni di nanoparticelle

In questa annualità è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di deposizione del CZTS da soluzioni (tramite *dip-coating*) e si è dato inizio ad un filone nuovo sulla preparazione di dispersioni di nanoparticelle di CZTS e sul loro uso per la crescita di film compatti da usare per la realizzazione di dispositivi fotovoltaici in CZTS. Il lavoro è stato svolto dall'Università di Trento.

Caratterizzazione delle doluzioni dol-gel

E' stato effettuato uno studio dettagliato delle soluzioni di partenza con lo scopo di ottimizzare il processo di produzione dei film di CZTS da soluzioni colloidali sol-gel.

Le soluzioni colloidali di CZTS *Zinc-rich/Copper-poor* ($Cu_{2-x}Zn_{1-x}SnS_4$ con x = 0,2) sono state preparate mescolando due diverse soluzioni non-acquose: una con i precursori metallici e l'altra con la tiourea. Sono stati analizzati diversi processi caratterizzati dall'uso di diversi solventi (acqua, etilene glicol, etanolo e metanolo), due diverse sorgenti di stagno (cloruro di stagno penta idratato o anidro) e diversi trattamenti termici finali. Riguardo a quest'ultimo punto si è visto che è possibile ottenere film di CZTS con buona stechiometria senza dover introdurre zolfo nell'annealing finale.

Misure Raman e FTIR sono state utilizzate per capire lo stato degli ioni metallici e della tiourea nelle due soluzioni e per capire come cambiano le specie che coordinano gli ioni metallici quando si mescolano le due soluzioni. In questa fase il colore della soluzione passa dal giallo limpido di partenza ad un colore bianco opaco, generando un sol metastabile che viene interpretato come il punto di partenza nel rilascio degli ioni solfuro. Ulteriori dettagli sono presentati nella relazione estesa (RdS/PAR2013/009).

La conclusione più importante di questa parte del lavoro è che la combinazione ideale di sali e solventi risulta essere quella in cui si utilizza il cloruro di stagno penta idratato come sorgente di stagno, il metanolo come solvente per i sali metallici e l' etilene glicol come solvente per la tiourea.

Crescita Del CZTS partendo da dispersioni di nanoparticelle

Il lavoro ha avuto l'obiettivo di produrre film sottili di CZTS, partendo da "inchiostri" di nanoparticelle (dispersione in toluene), utilizzando materiali di partenza i più semplici possibili e riducendo al massimo i residui organici nella dispersione finale. Quest'ultimo fattore può influenzare drasticamente il funzionamento del materiale all'interno di una cella fotovoltaica. A tal fine sono stati utilizzati i cloruri come sorgente dei cationi metallici, lo zolfo in polvere come sorgente di zolfo e soltanto oleilammina (OLA) come *capping agent*.

I sali metallici vengono sciolti in oleilammina e portati in temperatura in atmosfera controllata (vuoto e/o azoto). Lo zolfo viene introdotto in soluzione, iniettandolo velocemente nella soluzione dei precursori con OLA alla temperatura di 270 °C. Una volta ottenuta la soluzione finale, le nanoparticelle vengono lavate con una soluzione 1/5 di toluene ed etanolo e centrifugate per separarle dal surnatante. Il prodotto finale viene poi disperso in toluene.

Il problema principale di questo processo è la perdita di zinco durante la sintesi, dovuta al differente comportamento di questo complesso metallico rispetto a quelli di rame e stagno. Per mantenere un sufficiente contenuto di zinco nelle nanoparticelle si è intervenuti sia diminuendo il contenuto dell'agente legante (OLA) che aumentando la concentrazione di partenza, avendo però effetti diversi sulla qualità dei film sottili prodotti (ulteriori dettagli sono contenuti nella relazione estesa). E' comunque importante notare che in tutti i casi le sintesi sono state eseguite in eccesso di zinco e difetto di rame, condizione in cui i principali difetti che possono danneggiare le prestazione fotovoltaiche del materiale sono sfavoriti. Con le nostre condizioni di sintesi, è ragionevole prevedere la presenza di nanoparticelle di ZnS nel prodotto finale, ma la presenza di questa fase spuria non dovrebbe essere dannosa per le prestazioni dei dispositivi finali.

La sintesi adottata produce una soluzione colloidale di nanoparticelle sferiche monodisperse (Figura 148). Le osservazioni al SEM forniscono un diametro medio di 15 nm, in completo accordo con la misura ottica che dà una distribuzione di dimensioni centrata a 17 +/- 4 nm con un "Polidispersity Index" di 0.014, indicando la presenza di una sospensione monodispersa.

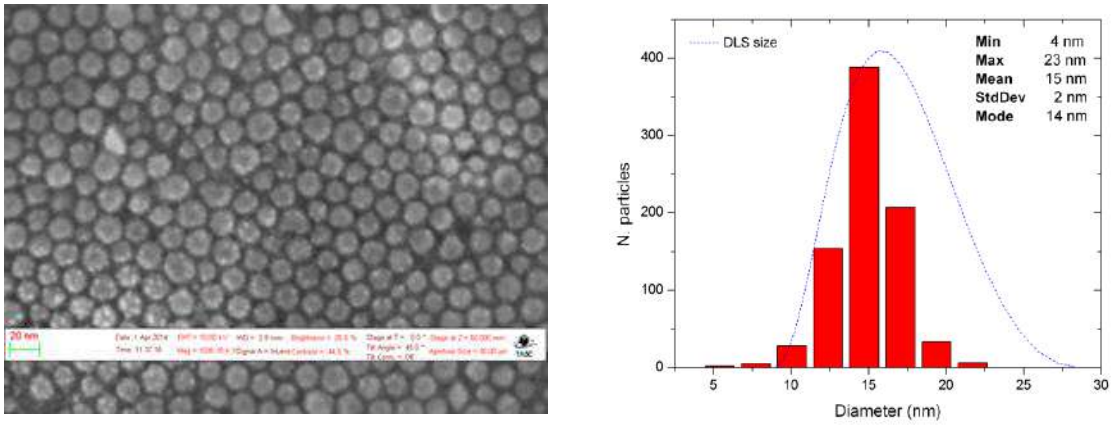


Figura 148. Immagine SEM delle nanoparticelle tipo (sinistra) distribuzione di dimensioni di particelle (destra) calcolata partendo dalle immagini SEM e misurata con DLS (Dynamic Light Scattering)

Dal punto di vista strutturale, le nanoparticelle sono prevalentemente di forma sferica ed hanno la peculiarità di avere una struttura *core-shell* con una fase esagonale all'interno e tetragonale all'esterno, probabilmente entrambe di CZTS. La Figura 149 mostra il profilo di diffrazione a raggi X e lo spettro Raman di un film di nanoparticelle depositato su un wafer di Silicio, dove si vede chiaramente la presenza delle due fasi: quella esagonale (wurtzite) e quella tetragonale (kesterite). Non ci sono evidenze di altri fasi spurie.

Una volta ottenuta la dispersione di nanoparticelle in toluene, il film viene depositato via spin-coating su vetro per procedere con le diverse caratterizzazioni e su Molibdeno per produrre le celle. La maggior parte del contenuto organico (toluene) viene rimosso con un trattamento termico in aria a 150 °C per 5 min.

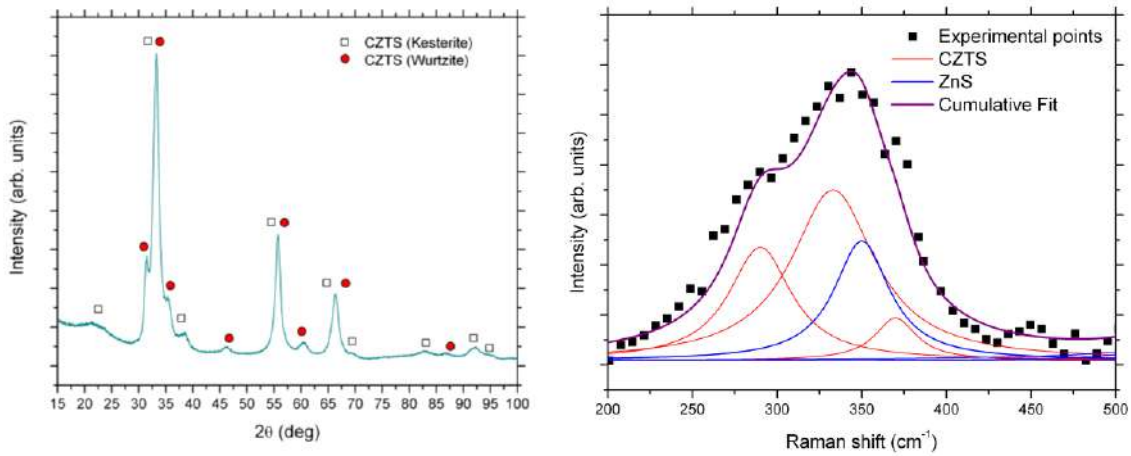


Figura 149. Profilo di XRD e spettro Raman di un film sottile prodotto per spin-coating di nanoparticelle disperse in toluene

Per lo step finale di ricristallizzazione sono stati eseguiti due diversi annealing ad alta temperatura (550 °C), tutti e due all'interno di una capsula (non stagna) e in flusso di argon: il primo con l'obiettivo di ricristallizzare il campione, il secondo, in presenza di zolfo, viene utilizzato per "eliminare" l'SnS residuo dal primo trattamento termico. La Figura 150 mostra la sezione di uno dei campioni ottenuti dopo la procedura completa di deposizione e trattamenti termici, dando evidenza di un campione omogeneo e compatto. Maggiori dettagli saranno mostrati nella relazione RdS/PAR2013/009.

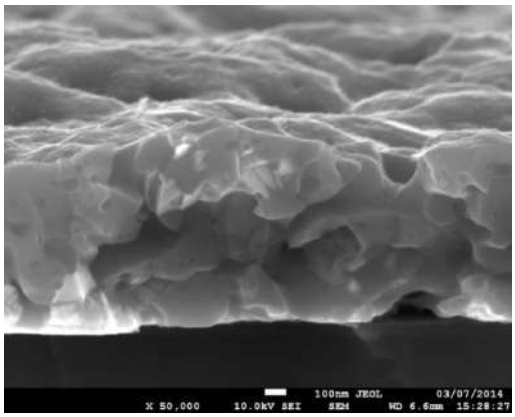


Figura 150. Sezione SEM di un campione depositato su vetro

c.2 Sviluppo di materiali per dispositivi tandem CZTS/c-Si

La struttura della cella tandem CZTS/c-Si è mostrata nella Figura 151. Un punto fondamentale è valutare quali materiali possano essere utilizzati per la costruzione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle. I materiali per questo strato (che chiameremo "*buffer p-type*") devono rispondere a particolari requisiti e rappresentano, quindi, il punto chiave per la realizzazione di questi nuovi dispositivi. La prima possibilità è quella di drogare il CZTS fortemente *p-type*. Questo sicuramente renderebbe la barriera con il silicio di tipo n stretta e fortemente conduttiva anche in inversa e potrebbe inoltre dare un effetto tipo "*Back Surface Field*". In alternativa si potrebbe pensare di realizzare una eterogiunzione con un materiale opportuno caratterizzato sostanzialmente da una alta *funzione-lavoro* (W > 5 eV), da una sufficiente stabilità chimica per resistere alla solforizzazione a 550 °C, necessaria per la crescita del CZTS, e da una gap uguale o maggiore di quella del CZTS per far passare la luce tramessa dal CZTS.

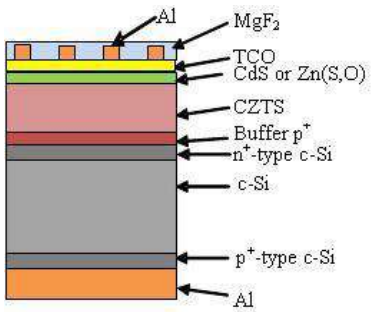


Figura 151. Struttura di una cella tandem CZTS/c-Si

Infine sarebbe utile avere un bordo della banda di conduzione più in alto di quello del CZTS per riflettere gli elettroni che dovessero diffondere verso il contatto posteriore.

Drogaggio di tipo p del CZTS

Ottenere un CZTS altamente drogato *p* non è particolarmente difficile visto che basta crescere il materiale con un piccolo eccesso di rame per avere conducibilità alte indotte da un'alta densità di antisiti Cu_{Zn}. Il problema, però, è riuscire a confinare l'eccesso di rame in una regione limitata vicino al contatto, impedendone la diffusione nel bulk del materiale. Da questo punto di vista si può pensare di usare degli altri metalli monovalenti di grandi dimensioni e minore diffusività.

Sono state effettuate delle prove preliminari di drogaggio inserendo un sottile strato di argento all'interfaccia tra molibdeno e precursore per analizzare inizialmente il comportamento del dispositivo a singola giunzione. Uno di questi campioni con 20 nm di Ag ha dato una giunzione funzionante, ma il dispositivo mostra un'efficienza inferiore al 2% a causa di una J_{SC} bassa e di anomalie nella caratteristica J-V di buio. Dall'analisi SEM (Figura 152) eseguita sulla cella con 20 nm di Ag all'interfaccia molibdeno/precursore si vede che il materiale presenta grani molto grandi e un'interfaccia netta priva di segregazioni: l'argento sembra quindi anche agire da *buffer layer* per prevenire il fenomeno del *blistering*. Tuttavia si può osservare che lungo tutta la sezione del CZTS compaiono delle piccole particelle chiare che potrebbero essere dei precipitati di solfuro d'argento.

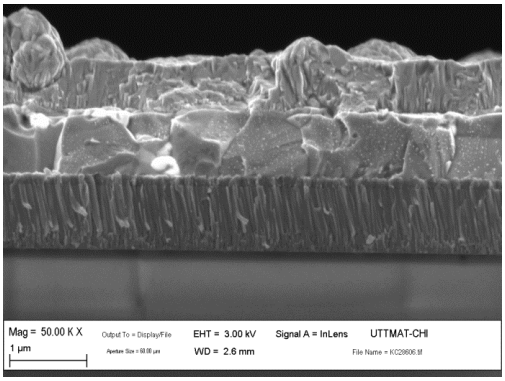


Figura 152. Immagine SEM della cella cresciuta su un substrato di Mo ricoperto da 20 nm di Ag

Queste prove preliminari andranno approfondite con una nuova serie di campioni a diversi spessori di Ag (o di altri metalli monovalenti) e con diversi trattamenti termici, allo scopo di ottenere un materiale con una buona interfaccia, senza evidenti fasi spurie e cercando di limitare la diffusione del drogante.

Utilizzo di uno strato di MoO_3 come buffer "p-type"

L'ossido di molibdeno esiste in diverse fasi. La fase più ossidata è l'MoO_3 che è un semiconduttore con gap abbastanza grande (circa 3,1 eV) generalmente di tipo n per vacanze di ossigeno. Una caratteristica fondamentale di questo semiconduttore è la sua alta funzione lavoro a cui però vengono assegnati valori molto diversi negli articoli di letteratura: da 5,3 a 6,85 eV. Una fase meno ossidata è l'MoO_2 che è praticamente un metallo. Anch'esso ha una work function alta ma non ben nota. Una simulazione del profilo delle bande per una cella tandem CZTS/c-Si con un "buffer p-type" di MoO_3 ottenuta supponendo che quest'ultimo abbia una work function di 5,7 eV è mostrata in Figura 153. La giunzione tunnel risultante sembra ottimale e anche il contatto con il CZTS presenta caratteristiche favorevoli.

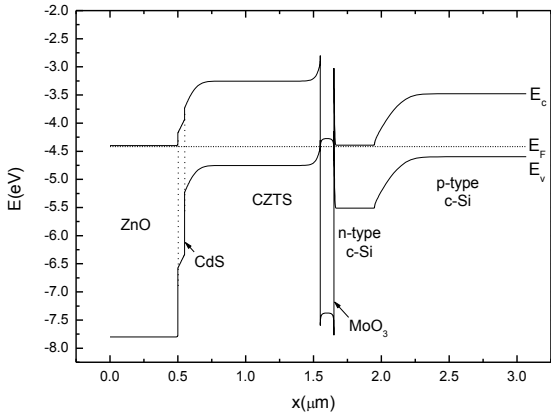


Figura 153. Simulazione del profilo delle bande per una cella tandem CZTS/c-Si con un "buffer p-type" di MoO_3

Partendo da alcuni lavori di letteratura, si provato ad ossidare il molibdeno prima della deposizione del precursore. Questo è, infatti, il modo più semplice con cui si può ottenere un layer di ossido di molibdeno. Dopo qualche prova si è deciso di ossidare in un forno a nastro il molibdeno per 30 min in aria a 300 °C: da misure di

riflettività si stima in maniera approssimata che in questo modo si ottiene un ossido spesso circa 100 nm. Il dispositivo realizzato su questo molibdeno ossidato presenta un'efficienza di poco superiore al 2%. Le basse prestazioni sono dovute essenzialmente ad una J_{SC} molto bassa (sotto 10 mA/cm^2). L'analisi SEM della sezione di uno di questi dispositivi suggerisce che la bassa corrente potrebbe essere dovuta alle piccole dimensioni dei grani. Supponendo che il layer di molibdeno ossidato sia abbastanza indefinito come stechiometria e come spessore, abbiamo provato a sostituirlo con un layer di ossido di molibdeno evaporato. Le primissime prove effettuate con questo approccio hanno avuto risultati insoddisfacenti a causa di problemi di adesione del film di CZTS che si tenterà di risolvere migliorando la compattezza e diminuendo lo stress dello stesso film di CZTS.

Utilizzo di uno strato di NiO come "buffer p-type"

Un altro possibile candidato come buffer *p-type* è l'ossido di Nichel (NiO), un semiconduttore a larga gap (3,7 eV) che generalmente è di tipo p.

La posizione delle sue bande rispetto a quelle del CZTS non è nota e anche l'allineamento con quelle dello ZnO è abbastanza controverso. In Figura 154 è mostrata una simulazione del profilo delle bande ottenuta supponendo che l'NiO abbia la banda di conduzione posizionata 2,53 eV sotto il livello di vuoto. Con questi valori ritenuti ragionevoli l'NiO non solo sarebbe un buon contatto *p-type,* ma potrebbe anche fare da *electron reflector*.

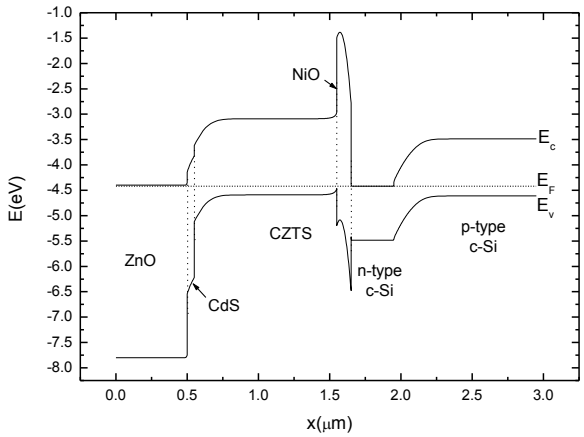


Figura 154. Simulazione del profilo delle bande per una cella tandem CZTS/c-Si con un "buffer p-type" di NiO

E' stato, quindi, eseguito fatto un test preliminare, depositando uno strato di circa 30 nm di NiO per sputtering reattivo sul substrato vetro/molibdeno. Su questo campione è stata poi fabbricata una cella in CZTS con le solite procedure. Purtroppo i dispositivi finali hanno mostrato delle bassissime resistenze di shunt e quindi delle V_{OC} di pochi mV. La foto SEM di uno di questi dispositivi (Figura 155) non chiarisce il motivo di questo primo risultato così negativo. Il CZTS sembra crescere sull'NiO ben compatto e con grani grandi e non sono visibili voids o fratture che potrebbero mandare la giunzione in cortocircuito. Una possibile ipotesi è che il nichel abbia diffuso nel CZTS rendendolo estremamente conduttivo. Questa ipotesi potrà essere confermata, realizzando lo stesso bilayer precursore CZTS/NiO su vetro e misurando la conducibilità del campione finale dopo la solforizzazione.

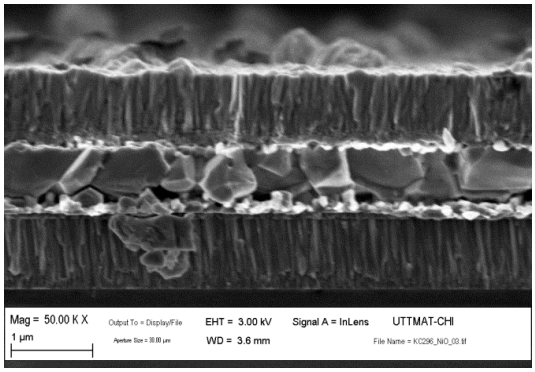


Figura 155. Immagine SEM della sezione della cella cresciuta su un substrato NiO/Mo/vetro

In conclusione possiamo dire che i deliverable previsti per la linea di ricerca C sono stati ottenuti parzialmente. Sono state esplorate diverse strade per aumentare l'efficienza delle celle fotovoltaiche in CZTS: correzione della stechiometria, aumento della pressione di sputtering dei precursori, modifiche dell'interfaccia CZTS/Mo, cambiamenti del processo di deposizione del CdS, etc.. Ognuna di queste strade ha portato ad una comprensione più approfondita della struttura del materiale e delle sue proprietà come assorbitore nelle celle fotovoltaiche di nuova generazione. Infatti i risultati ottenuti hanno consentito di individuare i problemi più importanti su cui concentrare le future sperimentazioni e consolidare le attuali efficienze di conversione fotovoltaica intorno al 6% su un consistente

numero di campioni e quindi su aree maggiori rispetti a quanto ottenuto nello scorso anno di attività. Questo risultato è ben più importante rispetto al singolo valore di efficienza da raggiungere del 7% perché garantisce la ripetibilità del materiale stesso, aspetto non trascurabile nell'ambito delle celle a film sottile. In sintesi il risultato di questo screening è che i due punti prioritari su cui lavorare sono l'interazione tra il substrato vetro/molibdeno ed il film di CZTS e l'aumento del livello di controllo del processo di solforizzazione che sarà consentito grazie all'acquisizione del nuovo forno di solforizzazione. Si proverà, inoltre, a migliorare la qualità del materiale drogandolo in maniera opportuna mediante l'introduzione di sodio nei film di CZTS. Nell'ambito, poi, dello sviluppo di tecniche di deposizione del CZTS da liquido, la tecnica basata sulla dispersione di nanoparticelle di CZTS, ottenute tramite un metodo di *hot-injection,* sembra particolarmente promettente.

E' iniziato, infine, un lavoro sullo sviluppo di giunzioni tunnel per celle tandem CZTS/c-Si, lavoro che da subito si è rivelato molto complesso. In particolare appare necessario munirsi di tecniche di indagine ad alta risoluzione spaziale, come XPS e SIMS, per garantire l'efficacia della ricerca.

d. Sviluppo di celle organiche

Lo scopo di questa linea di attività è quello di dare un contributo ai limiti di conversione delle celle fotovoltaiche organiche proponendo soluzioni in grado di apportare miglioramenti all'efficienza dei dispositivi. In particolare sono stati presi in considerazione due filoni di ricerca: il primo aveva l'obiettivo di ampliare lo spettro della radiazione solare efficacemente utilizzata dal dispositivo; il secondo invece si concentrava su soluzioni che potessero creare strutture ad elevato grado di ordine al fine di migliorare il trasporto elettrico delle cariche.

Le attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università di Napoli "Federico II" che, in particolare, si è occupata di sviluppare strutture ad elevato grado di ordine e ha collaborato con ENEA alla messa a punto degli strati luminescenti. L'applicazione di tali materiali nelle architetture di cella è stata effettuata nei laboratori dell'ENEA, con il coinvolgimento anche di personale dell'Università. Le attività sintetizzate nel seguito sono descritte nei dettagli nei rapporti RdS/PAR2013/010 e RdS/PAR2013/011.

L'obiettivo del primo filone di ricerca è stato quello di ampliare l'intervallo di assorbimento delle celle fotovoltaiche polimeriche grazie all'utilizzo di strati contenenti materiali luminescenti (*luminescent down*-shifting, LDS) che abbiano la funzione di "convertitori spettrali", siano, cioè, in grado di convertire lunghezze d'onda a più alta energia, non efficientemente assorbite dal materiale attivo, in fotoni di energia compresa nell'intervallo spettrale di assorbimento delle celle organiche. Generalmente questo tipo di approccio, applicato anche a dispositivi diversi da quelli organici, prevede la messa a punto di strati "esterni" al cuore del dispositivo che possono essere ottimizzati, indipendentemente dal dispositivo stesso, direttamente sul substrato su cui verranno depositati. In questo modo non si corre il rischio di danneggiare lo strato attivo della cella, deteriorandolo. Tuttavia parallelamente a questo approccio è stata avviata un'attività sulla messa a punto di strati luminescenti da utilizzare come interlayer nel dispositivo: in questa configurazione, la scelta del materiale luminescente è più critica in quanto esso deve possedere anche opportune caratteristiche elettriche. Poiché lo strato luminescente resta all'interno del dispositivo, quest'ultimo approccio risulta interessante in quanto, un successivo incapsulamento della cella (posto sul back) riesce a preservare tutta la struttura.

Il primo approccio, come già detto, consiste nel deporre sulla parte frontale del dispositivo uno strato (per lo più polimerico) contenente molecole luminescenti. Tipicamente i materiali LDS assorbono luce solare a bassi valori di lunghezza d'onda (300 ÷ 500 nm) e la riemettono a valori di lunghezza d'onda più elevati dove l'efficienza quantica esterna del dispositivo è alta. Per migliorare le attuali prestazioni dei nostri dispositivi organici fotovoltaici si è pensato di applicare ad essi uno strato lineare aggiuntivo esterno LDS del tipo host-guest. Esso è formato da un polimero (host) in cui vengono disperse molecole luminescenti (guest). Una delle principali problematiche da affrontare nella realizzazione di questo tipo di strato LDS è la dispersione delle molecole luminescenti nella matrice polimerica scelta. Sono state effettuate prove di dispersione di una molecola luminescente sia in omopolimeri quali polimetilmetacrilato (PMMA) e polistirene (PS) che in un copolimero diblocco PMMA-b-PS avente i due blocchi con valori di masse molecolari confrontabili e pertanto in grado di ordinarsi in domini lamellari per investigare la possibilità di disperdere le molecole luminescenti in modo preferenziale all'interno di uno soltanto dei due blocchi. Gli studi svolti nella precedente annualità, infatti, hanno mostrato la possibilità di disperdere preferenzialmente in uno solo dei blocchi del copolimero (PS) nanoparticelle metalliche (es. AuNPs). Sono stati, quindi, realizzati film luminescenti disperdendo una molecola luminescente commerciale fornita dalla BASF (Lumogen® F Blue 650) sia in omopolimeri (PMMA e PS) che in un copolimero diblocco (PMMA-block-PS). Tutti i film polimerici contenenti Lumogen mostrano assorbimento per lunghezze d'onda inferiori ai 430 nm.

Test preliminari sulla fabbricazione del dispositivo sono stati condotti applicando lo strato di PMMA (concentrazione al 2%) con Lumogen (0,3%) ad una cella fotovoltaica polimerica a struttura inversa costituita dalla sequenza di strati vetro/ITO/ZnO/PBDTTT-C:[70]PCBM/MoO_3/Ag (Figura 156).

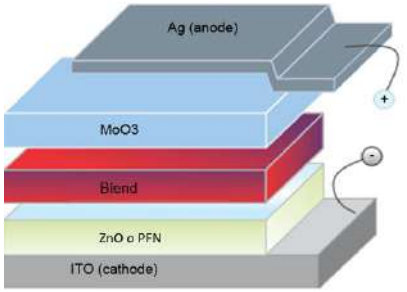


Figura 156. Schema di una cella polimerica a struttura inversa. Blend attiva utilizzata PBDTTT-CF:[70]PCBM

La blend utilizzata come strato attivo della cella assorbe nell'intervallo di lunghezza d'onda 400-800 nm, per cui l'utilizzo di uno strato LDS che assorba a valori di λ≈370 nm ed emetta nell'intervallo 400-800 nm potrebbe portare ad un miglioramento della efficienza quantica esterna del dispositivo. L'applicazione dello strato ha invece determinato un lieve peggioramento delle prestazioni della cella. Per capire le ragioni di questo fenomeno sono state eseguite misure di fotoluminescenza sul film utilizzato. In Figura 157 vengono riportate le curve di assorbimento e quelle di fotoluminescenza del film utilizzato per la fabbricazione della cella solare (PMMA al 2% e Lumogen 0,3%) e di un nuovo film recentemente ottenuto con una diversa concentrazione di PMMA (6%p), mantenendo però invariato il rapporto in peso Lumogen:PMMA (5%). I due film presentano spessori diversi: 100 nm nel caso del nuovo film e 550 nm per il film testato sulla cella solare. L'analisi delle curve di assorbimento e di PL mostra che nel caso del film di PMMA e Lumogen ottenuto da soluzione in toluene più concentrata (PMMA=6%, curve rosse) si ha un picco di assorbimento centrato a ≈ 370 nm stretto e intenso, mentre il picco di PL è estremamente slargato e di bassa intensità.

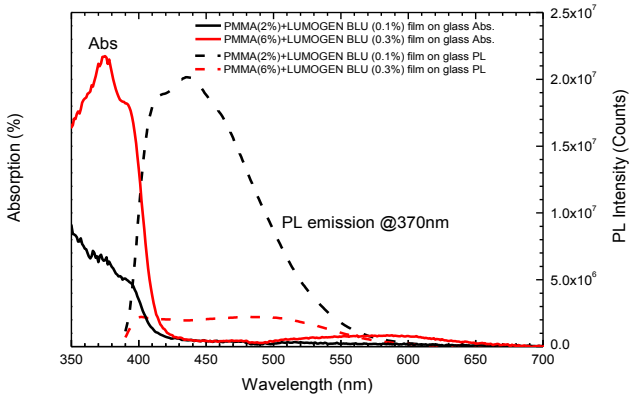


Figura 157. Curve di assorbimento e di fotoluminescenza di film su vetro di PMMA e Lumogen Blue di diverso spessore: 100 nm (curve nere) e 550 nm (curve rosse)

L'effetto negativo osservato sulla cella è, allora, ascrivibile allo spessore troppo elevato (550 nm) dello strato aggiunto che presenta bassa emissione di fotoluminescenza.

Al contrario il nuovo film ottenuto da soluzione meno concentrata (PMMA = 2%p) e Lumogen (0,1%) presenta un basso assorbimento alle basse lunghezze d'onda, ma determina un picco di fotoluminescenza stretto e molto intenso, come è possibile osservare dalle curve nere della Figura 157. Questo film appare quindi essere decisamente promettente per l'applicazione e verrà testato a breve, applicandolo ad una cella polimerica.

Accanto all'attività sulla realizzazione di strati LDS esterni al cuore del dispositivo, si è proceduto allo sviluppo di un materiale luminescente, il poli[(9,9-bis(3'-(N,N-dimetilamino)propil)-2,7-fluorene)-alt-2,7-(9,9-dioctilfluorene)] (PFN) da utilizzare come interlayer tra contatto frontale (ITO) e blend attiva. In questo modo il materiale svolge anche il ruolo di trasportatore di elettroni e viene impiegato in alternativa allo ZnO. Il polimero è caratterizzato da un picco di assorbimento a 378 nm, mentre quello di emissione è a 414 nm, riuscendo in tal modo a convertire lunghezze d'onda che sono scarsamente utilizzate dalla blend fotoattiva in altre in cui la blend riesce ad assorbire efficacemente. Lo strato di PFN è stato depositato per spin coating da soluzione in metanolo con aggiunta di acido acetico. Si è provveduto ad ottimizzare lo spessore di tale strato direttamente nell'architettura di cella (Vetro/ITO/PFN/blend/MoO_3/Ag) al fine di migliorare l'efficienza di conversione dei dispositivi. Lo spessore ottimale è di circa 20 nm. Il miglior dispositivo realizzato ha mostrato un'efficienza superiore all'8% (PCE= 8,04%, FF= 64,4%, J_{SC}= 16,4 mA/cm^2, V_{OC}= 757 mV). In Figura 158 viene mostrata la curva IV ottenuta illuminando il dispositivo con simulatore solare (spettro AM1.5g).

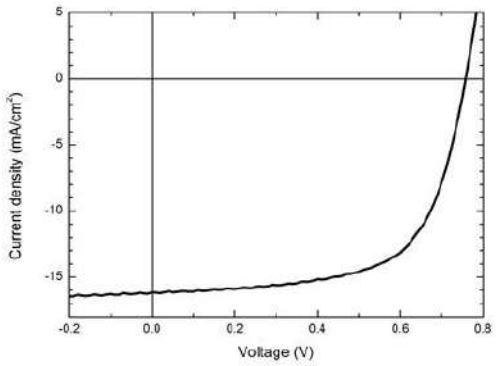


Figura 158. Curva IV della cella solare polimerica a struttura inversa vetro/ITO/PFN/PBDTTT-CF:[70]PCBM/ MoO_3/Ag sulla quale è stata misurata un'efficienza di 8,04%

L'obiettivo del secondo filone di ricerca era lo sviluppo di nanocompositi organici a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati e di molecole organiche con lo scopo di studiare la possibilità di fabbricare film polimerici da utilizzare come elemento attivo in celle fotovoltaiche totalmente organiche. 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 tal modo è possibile realizzare nanocompositi con proprietà fisiche speciali. L'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 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 ha previsto lo sviluppo di procedure per la realizzazione di strati polimerici in cui incorporare in modo selettivo molecole dell'estere metilico dell'acido [6,6]-fenil-C61-butirrico (PCBM), per la preparazione di film di nanocompositi da integrare in celle fotovoltaiche organiche. Infatti, il PCBM è un derivato del fullerene ed è un accettore di elettroni che in combinazione con donatori di elettroni può essere utilizzato per la costruzione di celle solari.

Sono stati preparati nanocompositi innovativi in cui la matrice polimerica è costituita da nanostrutture lamellari generate da un copolimero a blocchi simmetrico, il poli (stirene-b-metilmetacrilato) (PS-b-PMMA), con frazione in volume scelta in modo tale da ottenere una morfologia di tipo lamellare, i cui nanodomini lamellari sono stati poi selettivamente caricati con molecole di PCBM. Film sottili di PS-b-PMMA sono stati preparati mediante spin-coating o drop-casting su un substrato ricoperto di ITO. La scelta dell'ITO ha consentito di ottenere un'orientazione perpendicolare dei microdomini lamellari di PS e PMMA formati per self-assembly. Con queste nanostrutture sono stati poi realizzati nanocompositi per incorporazione selettiva di molecole di PCBM nei domini lamellari di PS. La struttura di questo composito è stata investigata tramite indagine TEM (Figura 159).

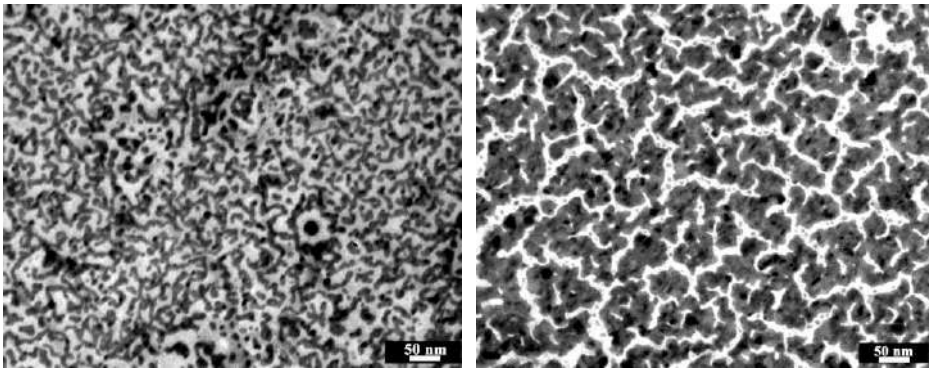


Figura 159. Immagini TEM bright-field di film di nanocompositi PS-*b*-PMMA/PCBM con 5wt% (a) and 10 wt% (b) di PCBM ottenuti per spin coating a temperature ambiente da soluzioni di toluene trattati con RuO_4 e trattati termicamente a 150°C per 6 h

Successivamente sono state determinate le proprietà elettriche di questi nanocompositi effettuando misure corrente/tensione (Figura 160). Il comportamento elettrico è stato valutato su dispositivi a sandwich ITO/PS-b-PMMA:PCBM/Al. L'elettrodo superiore in alluminio è stato depositato per evaporazione e successiva condensazione sulla superficie del film del nanocomposito in alto vuoto (10^{-7} mbar). Le misure di caratteristica I-V mostrano che il sistema è conduttivo e che la densità di corrente aumenta all'aumentare della concentrazione di PCBM, fino a 5 wt% (rispetto al peso di BCP) e diminuisce per concentrazioni maggiori (10 wt%). La diminuzione della conducibilità con l'aumentare del contenuto PCBM è dovuta alla parziale distruzione della morfologia a fasi separate associata alla tendenza del PCBM ad auto-aggregarsi ad alte concentrazioni. I sistemi nanostrutturati realizzati costituiscono un passo verso la realizzazione di celle solari organiche, visto che, come precedentemente detto, il PCBM è un accettore di elettroni e può essere utilizzato nei dispositivi in combinazione con donatori di elettroni. I risultati ottenuti confermano, quindi, che la strategia basata sull'utilizzo di copolimeri a blocchi nanostrutturati per la costruzione di dispositivi optoelettronici è una strada altamente promettente per la realizzazione di celle solari organiche caratterizzate da buone prestazioni.

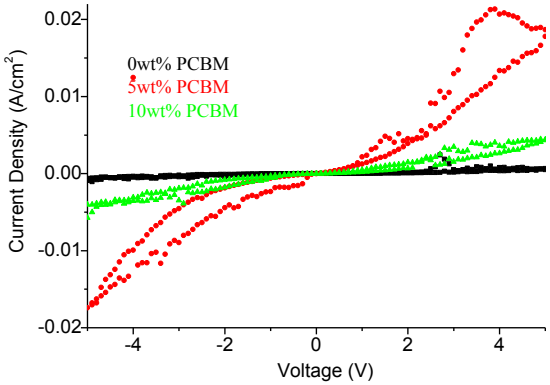


Figura 160. Grafico corrente-tensione (*I-V*) per il sistema ITO/PS-*b*-PMMA:PCBM/Al con diverso contenuto di PCBM

In conclusione si può affermare che gli obiettivi previsti dalla linea d sono stati pienamente ottenuti. Utilizzando un materiale luminescente posto tra il contatto frontale e la blend attiva è stata misurata un'efficienza superiore all'8% su una cella solare in configurazione inversa. Sono proseguiti, inoltre, gli studi sullo sviluppo di nanocompositi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati da utilizzare come matrice per l'infiltrazione selettiva di molecole organiche attive per l'applicazione ai dispositivi.

e. Comunicazione e diffusione dei risultati e collaborazioni internazionali

L'attività di diffusione della ricerca è stata svolta attraverso la presentazione dei risultati in convegni e congressi, pubblicazioni su riviste internazionali e attraverso l'organizzazione di un workshop che si è tenuto presso la Sede dell'ENEA di Roma. Tutte queste azioni hanno consentito di dare visibilità ai risultati ottenuti verso un'ampia platea e di aprire un confronto con gli altri gruppi di ricerca del settore, fondamentale per il progresso delle

attività di ricerca. Inoltre è stata garantita la partecipazione italiana all'Implementing Agreement "Photovoltaic Power System" della IEA in modo da rendere disponibili e pubblici i risultati degli studi condotti in questo ambito. Le attività sintetizzate in questo paragrafo sono descritte in maniera approfondita nel rapporto RdS/PAR2013/012.

Organizzazione del workshop "Stato e Prospettive del Fotovoltaico in Italia"

Il workshop, il cui programma dettagliato può essere visionato nel report esteso, si è svolto il 26 giugno 2014 presso la Sede ENEA di Roma. ENEA e RSE hanno aperto il convegno presentando i risultati raggiunti nell'ambito dei rispettivi Accordi di Programma sul tema del fotovoltaico. Partendo dalla presentazione di questi risultati, il convegno ha aperto un confronto tra la ricerca svolta dai più importanti gruppi nazionali impegnati sul fotovoltaico e le aspettative delle realtà produttive nazionali del settore. Tra gli interventi delle industrie si sottolinea la partecipazione della più grande industria fotovoltaica in Europa 3SUN (Catania), che produce moduli a film sottile di silicio. Si è svolta una tavola rotonda che ha cercato di evidenziare luci e ombre del settore, valutando la possibilità di delineare un percorso virtuoso col quale la ricerca possa promuovere l'innovazione del settore industriale a vantaggio dell'utente finale del sistema elettrico. Il Convegno ha avuto una grande rilevanza, circa 120 sono le persone che hanno partecipato ai lavori. Si può dire che il Convegno sia stata una delle poche occasione in Italia, almeno in tempi recenti, di incontro tra i principali attori coinvolti sul fotovoltaico (ricerca e industria) e questo ha consentito di fornire alla platea intervenuta un quadro completo di quanto in Italia viene svolto sul FV e delle prospettive del settore.

Attività svolte nel "Photovoltaic Power Systems Programme" della IEA

Nell'ambito delle linee di ricerca previste dal Programma PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme) della IEA, l'ENEA è inserita in un gruppo di lavoro che svolge attività sul tema del "High Penetration of PV Systems in Electricity Grids". Questa linea di attività si pone come obiettivo principale la promozione e l'incremento dell'uso della fonte fotovoltaica nelle reti elettriche, tenendo conto delle problematiche tecniche legate alla penetrazione di tali generatori nelle reti elettriche di trasmissione e distribuzione, inclusi i servizi ancillari e di rete da loro richiesti. In particolare, partendo dalla consapevolezza dei limiti tecnologici e delle attuali problematiche, il gruppo di lavoro intende studiare e proporre soluzioni tese a favorire la penetrazione ed integrazione in rete di un elevato numero di generatori fotovoltaici. A riguardo ENEA ha partecipato al 7th Experts Meeting and Workshop tenutosi in Australia (Sidney, Novembre 2013) contribuendo ai lavori con le attività il cui dettaglio è riportato nel rapporto esteso.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito delle attività previste dal tema di ricerca sono stati affidati contratti a diverse Università. Nel seguito sono riportate le Università, il titolo del tema e una breve sintesi delle attività svolte.

Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria- divisione di Optoelettronica

"*Cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare*"

E' stata condotta un'analisi numerica finalizzata alla progettazione di riflettori posteriori per celle solari a film sottile di silicio. Sono state progettate nanostrutture bidimensionali compatibili con la tecnologia di scrittura mediante Focused Ion Beam. Inoltre il modello è stato testato su substrati opportunamente progettati e realizzati su larga area mediante tecnica "replica molding". Partendo dall'analisi morfologica superficiale dei vari strati che compongono la cella e da una caratterizzazione ottica ed elettrica dei dispositivi cresciuti sui substrati nanostrutturati è stato effettuato un refining del modello. Si è evidenziato come il nuovo modello sia più attendibile nel prevedere il miglioramento in termini di assorbimento della luce ottenibile da celle solari realizzate su substrati nanopatternati rispetto a quelle realizzate con riflettore flat.

Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale

"Sviluppo di processi di testurizzazione di substrati di vetro con metodi chimici"

I temi sviluppati hanno riguardato la messa a punto di un innovativo processo di testurizzazione di substrati vetrosi con caratteristiche di semplicità realizzativa e, al contempo, di economicità del processo complessivo. La procedura sviluppata prevede l'attacco chimico di substrati vetrosi commerciali del tipo Soda Lime, impiegati nella

produzione di moduli fotovoltaici, mediante soluzioni acquose di acido fluoridrico di opportuna composizione o di miscele di acido fluoridrico ed acido cloridrico, a temperatura ambiente.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione Elettronica e Telecomunicazioni

"Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo per applicazione alle celle ad eterogiunzione silicio amorfo / silicio cristallino"

L'attività ha previsto la realizzazione e caratterizzazione di strati sottili di *Indium Tin Oxide* (ITO) per celle ad eterogiunzione silicio amorfo / silicio cristallino al fine di migliorare i contatti fra semiconduttore amorfo e TCO. Inoltre l'attività ha previsto la valutazione di eventuali effetti di danneggiamento della eterogiunzione durante la deposizione del contatto frontale mediante sputtering sia su superfici flat che a partire da silicio con superficie testurizzata.

Università di Roma "Sapienza", 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. In particolare l'Università ha condotto uno studio approfondito sulla fotoluminescenza dei campioni visto che recentemente è stato mostrato che l'energia a cui lo spettro di fotoluminescenza ha un massimo è ben correlata con l'efficienza dei dispositivi, essendo probabilmente legata alla densità dei difetti profondi.

Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

"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 due linee:

- Sviluppo di processo di deposizione del CZTS da fase liquida. In particolare in questa annualità si è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di deposizione del CZTS da soluzioni (tramite *dip-coating*) e si è dato inizio ad un filone nuovo di ricerca sulla preparazione di dispersioni di nanoparticelle di CZTS e sul loro uso per la crescita di film compatti da usare per la realizzazione di dispositivi fotovoltaici in CZTS.
- Caratterizzazione strutturale tramite XRD nell'ambito della quale sono state sviluppate appropriate metodiche 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.

Università di Napoli, Dipartimento di Chimica

"Materiali nanostrutturati a base di copolimeri a blocchi per celle fotovoltaiche"

L'obiettivo di questa attività di ricerca è stato lo sviluppo e lo studio di nanocompositi costituiti da copolimeri a blocchi (BCPs) nanostrutturati e molecole attive per la fabbricazione di celle solari organiche. L'attività ha previsto lo sviluppo di procedure per la realizzazione di strati polimerici in cui incorporare in modo selettivo molecole dell'estere metilico dell'acido [6,6]-fenil-C61-butirrico (PCBM), per la preparazione di film di nanocompositi da integrare in celle fotovoltaiche organiche.

Energia elettrica da fonte solare
Solare termodinamico

Nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il solare termodinamico può dare, in una prospettiva di medio termine, un contributo significativo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile, sia attraverso l'impiego di impianti di diversa taglia nel sistema elettrico nazionale, sia per gli sviluppi previsti per questa tipologia di impianti in aree più favorevoli dal punto di vista della radiazione solare diretta, come il Nord Africa, con trasmissione in Europa dell'energia elettrica prodotta.

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" 5 MW integrato con un ciclo combinato a gas in Sicilia (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.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Nell'ambito del programma della Ricerca di Sistema per il triennio 2012-2014, l'attività è stata finalizzata al:

- 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 è stato preso in esame 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. Verrà progettato un sistema da realizzare nell'impianto sperimentale PCS dell'ENEA Casaccia.

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 di 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 e diminuzione della emissività). 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, attraverso la sostituzione della consolidata tecnologia del coating a base di strati "cermet" (nano-compositi 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 la attuale tecnica di deposizione di sputtering magnetron insieme alla tecnica IBAD (Ion Beam Assisted Deposition).

Le attività di ricerca e sviluppo nel corso dell’annualità oggetto del presente rapporto, hanno avuto come obiettivo quello di realizzare film metallici molto sottili, dell’ordine di qualche nanometro, da impiegare in filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico utilizzando l’impianto prototipale di sputtering presente presso il C.R. ENEA di Portici realizzato nell’ambito del PAR 2012. Il compito della tecnica IBAD era quello di migliorare le proprietà metalliche di film sottili di tungsteno.

L’attività sperimentale ha permesso di evidenziare che, con la geometria di camera di processo attualmente disponibile e con le pressioni di processo consentite, per il tungsteno, come probabilmente per altri metalli di transizione ad alto numero atomico, energizzare il processo di sputtering tramite IBAD non consente di ottenere un miglioramento degli indici ottici. La futura sperimentazione dovrà quindi essere condotta con metalli a numero atomico più basso, quali il titanio, il niobio ed il molibdeno.

Utilizzando la stessa apparecchiatura sperimentale, sono state condotte inoltre prove di ossidazione e nitrurazione di strati sottili di alluminio mediante un processo del tipo MetaMode. Il processo MetaMode consiste nel depositare sul substrato, con tecnica magnetron sputtering in gas Argon, uno strato molto sottile di metallo nella “zona di deposizione” della camera di processo e, successivamente, nell’ossidare (ovvero nitrurare) questo strato mediante l’azione di una sorgente ionica installata nella “zona di reazione” della stessa camera ed alimentata da specie reattive quali O_2 o N_2. Alternando deposizione ed ossidazione (o nitrurazione) del metallo, possono essere fabbricati strati di ossido (ovvero nitruro) dello spessore desiderato.

L’obiettivo è stato quello di verificare quanto la sorgente IBAD installata sull’impianto di sputtering si presti ad essere utilizzata anche in qualità di elettrodo.

Gli impianti solari termodinamici utilizzano come unica o prevalente fonte di energia la radiazione solare e quindi sono soggetti alla sua naturale variabilità. Per sopperire a questo problema è necessario l’utilizzo di un sistema di accumulo termico che consente di migliore il funzionamento dell’impianto, aumentare non solo la sua capacità operativa ma anche di dispacciamento con una migliore integrazione con la rete elettrica e quindi questo sistema rappresenta uno degli elementi base per ottenere una riduzione del costo di produzione dell’’energia.

Attualmente si utilizza un sistema di accumulo a calore sensibile utilizzando miscele di sali fusi stoccati in due serbatoi (caldo e freddo), a temperature che dipendono dai parametri operativi dell’impianto (campo solare e ciclo termico). Nel caso del sistema di accumulo termico dell’impianto Archimede, il serbatoio freddo è a 29 0°C mentre quello caldo a 55 °C. Nel caso degli impianti che utilizzano un olio come fluido termovettore, la temperatura massima del serbatoio caldo è limitata a 380 °C.

Per quanto riguarda il sistema di accumulo termico, l’attività di ricerca è stata orientata allo studio di soluzioni più compatte a calore sensibile e/o latente che utilizzano come mezzo di accumulo un materiale inerte (es. cementi o materiale ceramico) e/o un materiale a cambiamento di fase (PCM). Tale sistema dovrà ridurre i costi e gli ingombri dell’accumulo termico rendendolo particolarmente adatto negli impianti di piccola/media taglia. Il concetto può essere, inoltre, estrapolabile ad impianti solari di grande taglia e con alte temperature, oltre che al settore convenzionale (recupero di calore industriale, condizionamento solare, etc.).

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).

I risultati dell’attività di ricerca del PAR 2012, ha evidenziato che l’uso di materiali a cambiamento di fase miscelati con opportune quantità di nano particelle sembrerebbe poter incrementare sia la capacità termica del mezzo che la sua diffusività. In particolare, per diverse temperature di riferimento, sono stati individuati e caratterizzati sia i PCM che le nanoparticelle, compatibili con essi e potenzialmente in grado di incrementarne le caratteristiche di capacità e diffusività termiche, studiate le caratteristiche delle miscele e valutata l’influenza delle nanoparticelle sulle loro proprietà.

Nell’ambito del PAR 2013 l’attività è stata orientata allo studio di un sistema di accumulo per impianti che utilizzano un gas come fluido termovettore, allo sviluppo, simulazione e caratterizzazione sperimentale di elementi base di accumulo sia in cementi speciali che in materiale nanoPCM per temperature operative intorno ai 250°C. L’obiettivo principale della sperimentazione è stato di verificare il comportamento termodinamico del sistema di accumulo e la congruenza dei tempi di carico e scarico dell’energia con le dinamiche proprie di impianto solare.

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. Si tratta di un'evoluzione della tecnologia ENEA, in cui il classico sistema di accumulo termico a doppio serbatoio è sostituito da un unico serbatoio con il generatore di vapore integrato al suo interno. L'integrazione dei due componenti va nell'ottica della semplificazione impiantistica e della riduzione dei costi specialmente in applicazioni di piccola e media taglia. L'attività di ricerca prevede lo studio, la progettazione, la realizzazione e la sperimentazione di sistemi per generazione di energia elettrica di piccole dimensioni basati sull'uso esclusivo di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo, utilizzando il serbatoio a sali fusi presente e disponibile nell'Impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA.

Nell'ambito del PAR 2013 l'attività ha previsto il completamento della sperimentazione e caratterizzazione termica del serbatoio di accumulo e del generatore di vapore iniziata nella scorsa annualità e la progettazione di un impianto di cogenerazione con turbina a vapore da realizzare presso l'impianto PCS. Le attività del progetto sono state articolate in tre obiettivi intermedi, corrispondenti a diverse linee di ricerca, più un obiettivo specifico relativo ad attività di comunicazione e diffusione dei risultati:

a. Sviluppo di strati sottili ceramici e metallici ad alta compattezza e densità
b. Studio di sistemi alternativi di accumulo termico
c. Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia
d. Comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali.

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 per tubi ricevitori utilizzando la tecnologia dei "filtri ottici di tipo interferenziale". Nell'ambito delle attività già espletate assume particolare rilievo la realizzazione di un impianto prototipale di sputtering dell'ENEA sul quale è ora possibile condurre processi di deposizione di tipo 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.

a.1 Fabbricazione e caratterizzazione di strati sottili metallici e dielettrici per la realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale

Le attività di ricerca e sviluppo avevano come obiettivo quello di realizzare film metallici molto sottili, dell'ordine di qualche nanometro, da impiegare in filtri interferenziali multistrato ceramico-metallico in modo da migliorare le prestazione fototermiche dei tubi ricevitori per impianti solari termodinamici a collettori parabolici lineari (Parabolic Trough).

La prima tecnica sperimentata per depositare film sottili metallici è stata quella del magnetron sputtering assistita da sorgente ionica (IBAD). Le deposizioni sono state condotte adoperando l'impianto prototipale di sputtering dell'ENEA presente presso il C.R. di Portici e che era stato modificato ed attrezzato, nell'ambito della precedente annualità, con un cannone ionico Kaufman & Robinson (KRI, mod. EH200/MHC1000) per poter condurre processi di deposizione di tipo IBAD. Ricordiamo, peraltro, che l'impianto di sputtering in questione poteva lavorare sia su substrati piani che su substrato (o porta-substrato) tubolare rotante. Nella Figura 161a è riportata un'immagine della sezione di deposizione (lato aria) dell'impianto con il sistema di movimentazione della sorgente IBAD e l'adduzione gas, mentre nella Figura 161b è mostrato un particolare (lato vuoto) del portello centrale della camera su cui è installato l'hardware IBAD (sulla sinistra la sorgente IBAD, ovvero il cannone ionico, e sulla destra il target di tungsteno "alimentato" dalla sorgente di sputtering costituita da un catodo standard magnetron).

L'utilizzo della tecnica IBAD era rivolto al miglioramento delle proprietà metalliche di film sottili di tungsteno. E' stata sperimentata sia in modalità alternata (dove il processo di sputtering e quello del bombardamento ionico si susseguivano nel tempo), sia in modalità confocale (che prevedeva l'azione simultanea del processo di sputtering e del bombardamento del cannone ionico); peraltro alcune prove preliminari di deposizione in configurazione confocale erano state condotte già a partire dalle ultime settimane della precedente annualità.

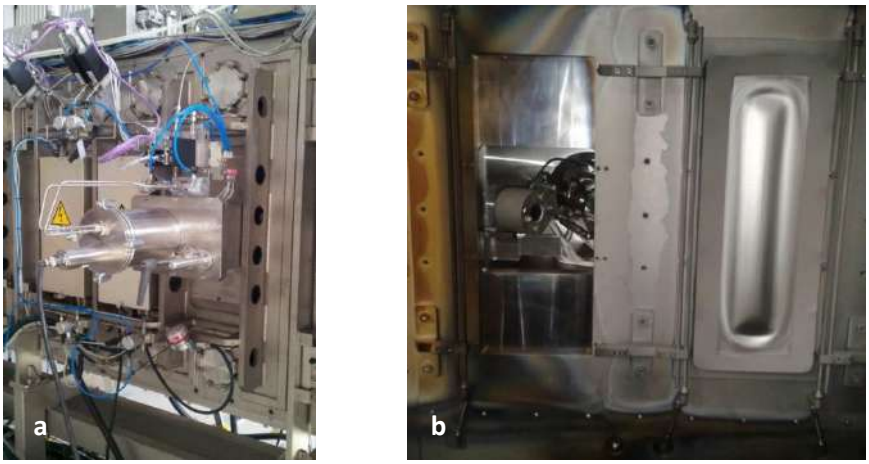


Figura 161. (a) Sezione di deposizione dell'impianto di sputtering ENEA (b) Vista frontale lato vuoto del portello centrale della camera di processo su cui è installato l'hardware IBAD

L'attività sperimentale condotta in modalità alternata ha permesso di utilizzare il cannone ionico in maniera ottimale. In pratica sono state esplorate tutte le possibili condizioni di deposizione (da quella ad alta energia, in cui l'interazione degli ioni argon era talmente forte da causare prevalentemente l'etching del materiale depositato, a quella a più bassa energia, in cui l'interazione degli ioni era praticamente assente) e, nonostante ciò, non si sono ottenuti miglioramenti significativi delle proprietà ottiche del materiale. Questo risultato non ha lasciato nessun dubbio sul fatto che, per migliorare le proprietà ottiche di film sottili di tungsteno, l'unica strada da seguire è quella di rendere disponibile l'energia degli ioni del cannone in simultanea con la formazione della struttura del film metallico.

A titolo di esempio, nella Tabella 54 e nei grafici di Figura 162 si riportano i parametri di processo di alcune delle deposizioni "IBAD" di tungsteno effettuate in modalità alternata ed i parametri ottici (n e k) dei film prodotti.

Tabella 54. Velocità di deposizione dei film sottili di tungsteno in modalità alternata al variare del potenziale applicato al cannone ionico

Campione	Potenziale del cannone ionico (V)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
W_255	0	4	74,4	18,6
WI_020	300	10	34,1	3,4
WI_022	250	10	50,6	5,1
WI_023	200	10	59,8	6,0
WI_024	150	8	88,3	11,0
WI_025	100	5	84,5	16,9
WI_026	225	12	69,4	5,8
WI_027	175	10	70,4	7,0

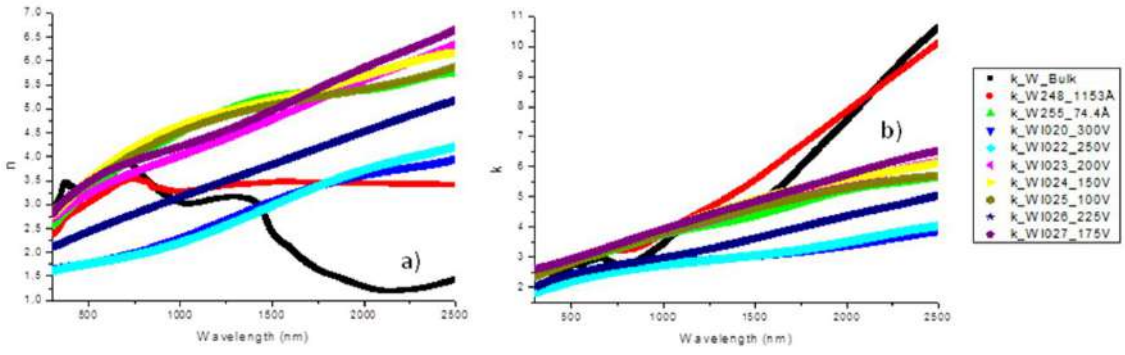


Figura 162. Indice di rifrazione (grafico a) e coefficiente di estinzione (grafico b) dei film di W realizzati a diversi potenziali del cannone ionico in modalità alternata a confronto con i parametri ottici del tungsteno di riferimento

Nel caso dell'attività sperimentale condotta in modalità confocale non è stato possibile valutare a pieno le potenzialità della tecnica IBAD a causa dei vincoli imposti dalle caratteristiche tecniche e geometriche del sistema di deposizione. Due motivi essenzialmente impedivano di sfruttare le potenzialità del cannone ionico. Il primo riguardava la geometria della camera di processo che non consentiva una disposizione del cannone ionico in confocale, tale da avere angoli e distanze adeguate ad ottenere urti efficaci al solo miglioramento delle proprietà ottiche del film sottile. Il secondo motivo era la non completa compatibilità della tecnica IBAD con la tecnica di deposizione del magnetron sputtering a causa della pressione di processo troppo alta della tecnica di sputtering, che non consentiva di fornire l'energia sufficiente agli ioni argon del cannone. In entrambi i casi, intervenire sull'impianto per apportare le modifiche necessarie risultava tecnicamente ed economicamente troppo oneroso. Tuttavia risulta abbastanza chiaro che, con la geometria di camera di processo attualmente disponibile e con le pressioni di processo consentite, per il tungsteno, come probabilmente per altri metalli di transizione di alto numero atomico, energizzare il processo di sputtering tramite IBAD non consente di ottenere la desiderata trasformazione da fase nucleativa del tipo "multi-islands" a quella del tipo "layer-by-layer" con conseguente miglioramento degli indici ottici. L'enorme mole di lavoro sperimentale condotto sul tungsteno prodotto con tecnica IBAD è stata utile ad indicarci che la futura sperimentazione, condotta sempre adoperando l'impianto di sputtering dell'ENEA dotato del cannone ionico KRI, dovrà essere condotta con metalli a numero atomico più basso, quali il titanio, il niobio ed il molibdeno.

A titolo di esempio, nella Tabella 55 e nei grafici di Figura 163, si riportano i parametri di processo di alcune delle deposizioni "IBAD" di tungsteno effettuate in modalità confocale ed i parametri ottici (n e k) dei film prodotti.

Tabella 55. Velocità di deposizione dei film sottili di tungsteno realizzati in modalità confocale con il cannone ionico montato ad una distanza di 10 cm dal substrato

Campione	Potenziale del cannone ionico (V)	Pressione (µbar)	Velocità di traslazione (mm/min)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
WI_035	211	0,4-0,5	1000	1	123,7	123,7
WI_036	300	0,4-0,5	1000	1	119,5	119,5
WI_037	300	0,4-0,5	8000	8	101,7	12,7

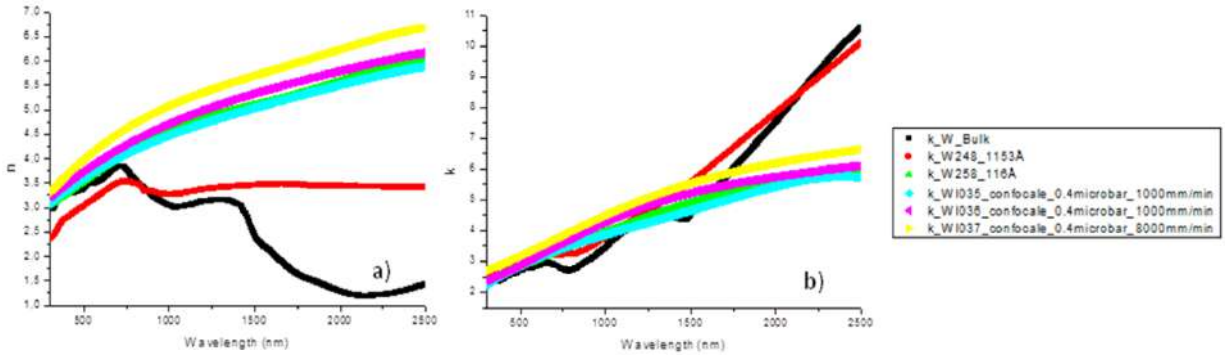


Figura 163 - Indice di rifrazione (grafico a) e coefficiente di estinzione (grafico b) dei film di W realizzati in modalità confocale (con distanza cannone/substrato di 10 cm) a confronto con i parametri ottici del tungsteno di riferimento

Come valida alternativa alla deposizione "energizzata" del singolo metallo di transizione, si è scelto di procedere sperimentando nuovi tipi di materiali. L'attenzione è stata quindi focalizza sulla possibilità di combinare due metalli in modo da formare materiali compositi dalle proprietà metalliche adatte allo scopo di questo progetto. L'obiettivo era quello di realizzare film sottili di metallo costituiti da una matrice metallica in cui erano disperse particelle di un altro metallo. L'idea di base era di far prevalere nel NIR e nell'IR il comportamento metallico della matrice, che doveva pertanto essere un metallo alto riflettente in questa regione, mentre bisognava far prevalere nel visibile le proprietà ottiche delle dispersioni metalliche, che dovevano appartenere a un metallo basso riflettente in questo intervallo spettrale. I materiali scelti sono stati l'alluminio per matrice metallica e il tungsteno come metallo da disperdere nella matrice d'alluminio.

La tecnica di deposizione adoperata era il co-sputtering. La prima serie di campioni è stata realizzata con una percentuale volumetrica di alluminio pari al 65% e di tungsteno pari al 35%. Una volta fissate le potenze per ottenere queste percentuali volumetriche, le dimensioni delle dispersioni sono state variate modificando la velocità di traslazione e di rotazione del porta-substrato tubolare. In questo modo è stato possibile individuare il campione con le proprietà metalliche migliori per essere impiegato in un filtro interferenziale multistrato ceramico-metallico. La velocità di deposizione di questo campione era pari a circa 100 Å/ciclo. Il passo successivo dell'attività sperimentale è stato quello di variare le percentuali in volume dei due metalli al fine di migliorare ulteriormente le proprietà riflettenti del materiale composito.

I campioni realizzati mostravano un miglioramenti delle prestazioni ottiche quando diminuivano le percentuali volumetriche del tungsteno. Infatti, sia il campione al 3% sia quello al 20% di tungsteno, avevano un n più basso di quello del campione al 35% di tungsteno e un k migliore sia in valore assoluto sia nel modo di crescere in funzione della lunghezza d'onda.

Il campione al 20% di tungsteno è risultato il più adatto per la realizzazione di un filtro assorbitore solare a struttura multistrato ceramico-metallico. Infatti, il suo potere riflettente era ancora molto buono nella regione dell'IR, anche se inferiore a quello dell'alluminio puro, ma allo stesso tempo non era tanto alto quanto quello dell'alluminio puro nella regione del VIS. Il motivo che rendeva questo materiale inutilizzabile per la realizzazione dei filtri ottici interferenziali era la sua alta velocità di deposizione; infatti, si depositavano circa 200 Å a ogni singola passata davanti ai target dei metalli, spessore troppo grande per il primo strato di un filtro interferenziale multistrato ceramico-metallico.

Una caratteristica molto interessante mostrata dai materiali metallici compositi riguardava l'invarianza delle loro proprietà ottiche dallo spessore del materiale depositato a dimostrazione del fatto che la struttura cristallina si ripeteva nella stessa maniera ogni volta che si depositava un nuovo strato. Questa proprietà è molto utile nella fase di progettazione di un filtro interferenziale ceramico-metallico; infatti, anche se lo spessore degli strati metallici cambia in funzione della posizione occupata all'interno del filtro interferenziale, le loro proprietà ottiche non si modificano.

L'ultimo passo è stato di utilizzare il miglior materiale composito al 35% di tungsteno e al 65% di alluminio in volume per simulare la riflettanza spettrale di un filtro interferenziale multistrato ceramico-metallico. La struttura sviluppata aveva lo stesso numero di strati della struttura ENEA ottimizzata per la temperatura di 580 °C, descritta in dettaglio nel rapporto RdS/2013/076 (PAR 2012), con la differenza che al posto del tungsteno di riferimento vi era il materiale metallico composito.

La struttura con il materiale metallico composito, (Tabella 56) è stata ottimizzata in modo da avere lo stesso assorbimento solare della struttura con il tungsteno di riferimento, ma così facendo non si è riusciti a soddisfare il requisito sull'emissività emisferica poiché il materiale realizzato non era ancora performante come il tungsteno di riferimento. Infatti, come si evince dal grafico di Figura 164, la riflettanza del materiale composito era più alta di quella del tungsteno di riferimento nella regione del visibile, laddove avrebbe dovuto essere più bassa, mentre era più bassa di quella del tungsteno di riferimento nella regione dell'Infrarosso, laddove avrebbe dovuto essere più alta.

Tabella 56. Caratteristiche struttura multistrato che utilizzava come metallo il materiale metallico composito WAl_007

Strato	Materiale	Indice rifrazione	Coefficiente di estinzione	Spessore ottico (FWOT)	Spessore fisico (nm)	Spessore geometrico
Mezzo	Air	1,00000	0,00000			
1	SiO_2 (palik)	1,46180	0,00000	0,20159541	70,33	0,137908
2	AlN	2,13400	0,00064	0,15731841	37,60	0,073719
3	WAl_007	1,93966	3,74599	0,01785900	4,70	0,009207
4	AlN	2,13400	0,00064	0,23138424	55,30	0,108427
5	WAl_007	1,93966	3,74599	0,02172444	5,71	0,011200
6	AlN	2,13400	0,00064	0,22525777	53,83	0,105556
7	WAl_007	1,93966	3,74599	0,03367746	8,85	0,017362
8	AlN	2,13400	0,00064	0,21936923	52,43	0,102797
9	W (palik)	3,43114	2,71371	0,87460509	130,00	0,254901
Substrato	Air	1,00000	0,00000			
Spessore totale				1,98279105	418,75	0,821081

Lunghezza d'onda di riferimento: 510 nm; Angolo incidente: 0°

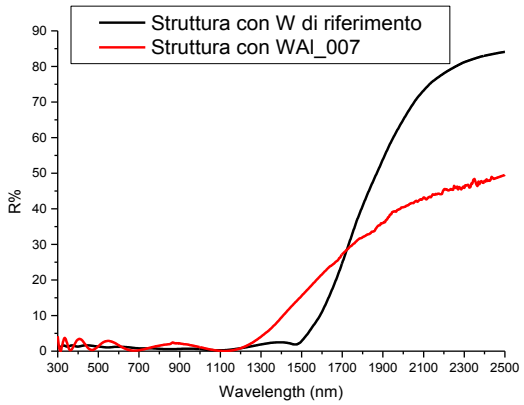


Figura 164. Riflettanza della struttura multistrato ottimizzata per i 580°C della struttura ottenuta utilizzando il materiale composito WAl_007 e di quella con tungsteno come riferimento

La situazione era ancora più critica se si imponeva il vincolo sullo spessore minimo di materiale composito che si riusciva a depositare. In questo caso sia l'assorbanza solare sia l'emissività emisferica erano molto lontani dai valori desiderati. Il risultato della progettazione ottica, pur non avendo raggiunto i requisiti fototermici di progetto, ha indicato un incoraggiante miglioramento rispetto alla stratificazione interferenziale con componente metallico di solo tungsteno.

Costatato sperimentalmente che la fase nucleativa di crescita del tungsteno mal si presta a modifiche sostanziali sotto l'effetto di ioni energizzanti la "surface mobility" degli "adatoms", per l'attività di ricerca e sviluppo condotta per migliorare le proprietà metalliche di film molto sottili di metallo mediante la tecnica IBAD, nella prossima annualità si prenderà in considerazione la possibilità di testare la suddetta tecnica su un metallo dal peso molecolare molto più basso di quello del tungsteno (titanio, molibdeno, niobio). In questo caso, dovendo gli ioni del cannone agire su particelle di minor peso, è probabile che l'energia fornita dagli ioni del cannone nell'attuale configurazione confocale sia sufficiente a migliorarne le proprietà metalliche. La finalità sarà sempre quella di valutare se la tecnica IBAD abbinata alla tecnica del magnetron sputtering sia in grado migliorare significativamente le proprietà metalliche di film depositati con spessori molto sottili.

Viste i risultati del lavoro sperimentale che mostrano chiaramente le interessanti potenzialità espresse dai materiali metallici compositi nel mantenere bassa la riflettanza nel visibile ed alta nell'intervallo NIR-IR, nella prossima annualità si procederà con lo sperimentare altre coppie di metalli (molibdeno-argento, niobio-argento, etc.) opportunamente scelte con la finalità di modificare ulteriormente l'andamento spettrale della riflettanza.

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/223.

a.2 Sperimentazione preliminare di tecnica MetaMode mediante l'utilizzo della sorgente IBAD

Le attività di ricerca e sviluppo pianificate ed espletate avevano come obiettivo ultimo la realizzazione di ossidi e nitruri d'alluminio di buona qualità ottica mediante la tecnica del MetaMode. Il MetaMode consiste nel depositare sul substrato, con tecnica magnetron sputtering in gas argon, uno strato molto sottile di metallo nella zona di deposizione della camera di processo e, successivamente, nell'ossidare (ovvero nitrurare) questo strato mediante l'azione di una sorgente ionica installata nella zona di reazione della stessa camera ed alimentata da specie reattive quali O_2 o N_2. Alternando deposizione ed ossidazione (o nitrurazione) del metallo, possono essere fabbricati strati di ossido (ovvero nitruro) dello spessore desiderato.

La campagna sperimentale è stata preceduta da una ricerca bibliografica che aveva la finalità di individuare vantaggi e criticità della tecnica proposta per la realizzazione di ossidi e nitruri. La tecnica MetaMode era stata ideata e messa a punto per produrre film di ossido e nitruro di buona qualità ottica, con velocità di deposizione di un ordine di grandezza maggiore di quella possibile con magnetron sputtering reattivo convenzionale, evitando i ben noti problemi di uniformità di deposito e controllo di processo particolarmente critici per deposito reattivo su larga area. Nonostante questi vantaggi, la tecnica MetaMode presentava delle criticità peculiari che ne avevano limitata la diffusione. In particolare, uno degli aspetti più delicati era quello di ottenere un efficace isolamento tra la zona di deposizione e la zona di reazione sufficiente a preservare la superficie del/dei target metallici da processi di ossidazione e/o nitrurizzazione.

L'impianto prototipale di sputtering dell'ENEA che è stato impiegato per l'espletamento della campagna sperimentale sul MetaMode, usato anche per la conduzione delle attività di sviluppo process" e fabbricazione materiali di cui al subtask a.1, era nato come sistema di deposizione del tipo in scansione con tecnica di sputtering mediante catodi magnetron e, pertanto, mal si prestava a soddisfare il requisito sull'isolamento tra la zona di deposito e quella di reazione. Per utilizzare quest'impianto anche con la tecnica MetaMode è stato necessario separare temporalmente piuttosto che spazialmente il processo di deposizione da quello di reazione con un notevole allungamento dei tempi di processo.

L'altro aspetto critico della tecnica MetaMode riguarda la sorgente ionica le cui caratteristiche tecniche dovevano essere molto flessibili in modo da garantire ampi margini di variazione del grado di ionizzazione e del livello di

energia degli ioni del gas reattivo, e quindi, della reattività del gas stesso nella zona di reazione. Una sorgente per processo MetaMode doveva essere in grado di fornire buoni livelli di densità di corrente del fascio di ioni del gas reattivo (qualche mA/cm^2) e valori dell'energia degli ioni sufficientemente alta a penetrare sottili strati metallici, ma non troppo alta da far prevalere il fenomeno dell'erosione rispetto a quello della deposizione. La scelta della sorgente è stata indirizzata verso il cannone ionico Kaufman & Robinson di cui era stato dotato l'impianto di sputtering dell'ENEA, nell'ambito del PAR 2012, per poter condurre processi di deposizione di tipo IBAD. La sorgente Kaufman, anche se non era in grado di soddisfare tutte le caratteristiche tecniche desiderate, aveva una buona probabilità di realizzare i materiali d'interesse per questo progetto riducendo al minimo l'investimento economico.

Una volta apportate le necessarie modifiche all'impianto di deposizione (consistenti in attrezzaggio della sorgente ionica con l'apposito kit per gas reattivi; sostituzione dell'adduzione di gas argon del cannone con ossigeno o azoto; opportuno puntamento e posizionamento del cannone) sono stati depositati gli ossidi ed i nitruri di alluminio.

Si è partiti con la deposizione degli ossidi d'alluminio: numerosi test sperimentali sono stati condotti per determinare i parametri del processo di deposizione e del processo di ossidazione mediante i quali realizzare materiali con buona qualità ottica. Un'attenzione particolare è stata dedicata all'individuazione delle condizioni di processo che favorivano la crescita dell'ossido nel minor tempo possibile. Com'era prevedibile, man mano che aumentava la velocità di traslazione davanti al cannone ionico bisognava aumentare parimenti il potenziale applicato al cannone ionico al fine di preservare la qualità ottica del materiale.

A titolo di esempio si riportano nella Tabella 57 i parametri di processo utilizzati per la fabbricazione dei diversi materiali realizzati per una velocità di traslazione davanti al cannone ionico pari a 2 m/min.

Tabella 57 - Parametri di processo utilizzati per realizzare i campioni con una velocità di traslazione davanti al cannone ionico di 2000 mm/min e relative velocità di deposizione

Campione	Potenziale del cannone (V)	Pressione (µbar)	Velocità di rotazione (rpm)	Velocità di traslazione (mm/min)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
MAl_2O_3_006	100	0,2	60	2000	30	565	18,8
MAl_2O_3_007	125	0,2	60	2000	30	531	17,7
MAl_2O_3_008	150	0,2	60	2000	30	517	17,2
MAl_2O_3_009	175	0,2	60	2000	30	480	16,0
$MAl_2O_3$3_010	200	0,2	60	2000	30	463	15,4
MAl_2O_3_011	250	0,2	60	2000	30	436	14,5

Nei grafici di Figura 165 sono riportati i parametri ottici dei campioni della tabella precedente: tra i film di Al_2O_3 depositati con una velocità di traslazione davanti al cannone ionico di 2 m/min, il film a 250 V (MAl_2O_3_011) può essere considerato un materiale ceramico di buona qualità ottica.

L'attività sperimentale è proseguita mettendo a punto il processo di deposizione del nitruro d'alluminio: in questo caso i margini di manovra che si avevano sulla scelta dei parametri di processo erano piuttosto limitati a causa del basso potere reattivo dell'azoto rispetto a quello dell'ossigeno. In pratica, le condizioni di processo per ottenere un materiale con buona qualità ottica erano poco modificabili intorno al punto di lavoro individuato tanto da poter essere considerate univoche.

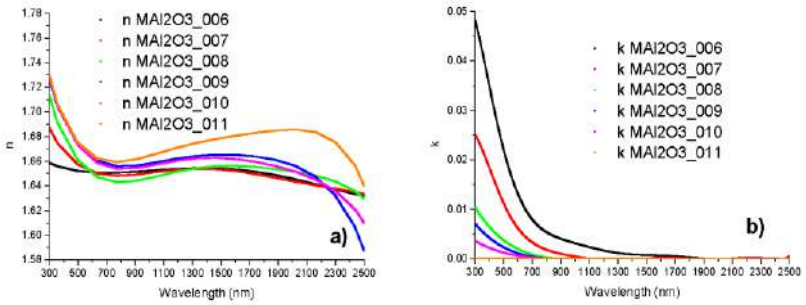


Figura 165 - Indice di rifrazione a) e coefficiente d'estinzione b) dei film di Al_2O_3 depositati con una velocità di traslazione davanti al cannone ionico di 2000 mm/min

Si riportano in Tabella 58, i parametri di processo utilizzati per nitrurare i film d'alluminio realizzati con una velocità di transizione davanti al target d'allumino di 8 m/min e relative velocità di deposizione, mentre i grafici di Figura 166 mostrano i parametri ottici dei campioni prodotti confrontati con l'AlN di riferimento (il campione MAlN_011 non è riportato per non comprimere eccessivamente le scala del k).

Dall'analisi delle proprietà ottiche (n e k) si evince che il campione MAlN_010, avendo un indice di rifrazione n e un coefficiente d'estinzione k molto simili a quelli del materiale di riferimento, può essere considerato un materiale di buona qualità ottica.

Per approfondimenti e valutazioni tecniche sull'attività sopra descritta si rimanda al Rapporto RdS/PAR2013/224.

Tabella 58 - Parametri di processo utilizzati per nitrurare i film d'alluminio realizzati con una velocità di transizione davanti al target d'allumino di 8000 mm/min e relative velocità di deposizione

Campione	Potenziale del cannone (V)	Pressione (µbar)	Velocità di rotazione (rpm)	Velocità di traslazione (mm/min)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
MAlN_007	125	0,2	60	500	50	322	6,4
MAlN_008	100	0,2	60	500	50	354	7,1
MAlN_009	75	0,2	60	500	50	394	7,9
MAlN_010	50	0,2	60	500	50	417	8,3
MAlN_011	25	0,2	60	500	50	382	7,6

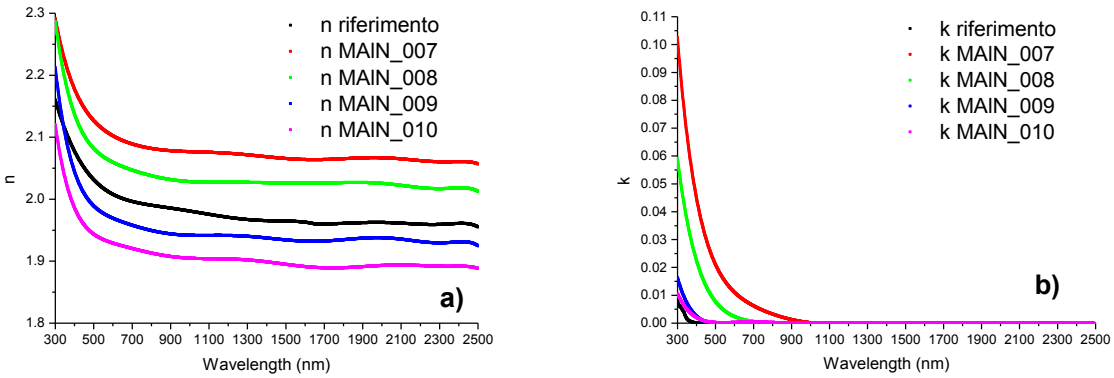


Figura 166 - Indice di rifrazione a) e coefficiente di estinzione b) dei film di AlN depositati con una velocità di traslazione davanti al target di alluminio di 8000 mm/min a confronto con gli n e k del film di AlN di riferimento

b. Studio di sistemi alternativi di accumulo termico

Le attività hanno riguardato lo studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di nuovi sistemi di accumulo termico. In particolare è stata valutata la possibilità di realizzare un accumulo termico in impianti che utilizzano gas come fluido termovettore e sono stati analizzati nuovi sistemi di accumulo termico a calore sensibile che utilizzano sia materiali inerti (es. cementi speciali) che miscele di materiali a cambiamento di fase PCM con aggiunta di nanoparticelle per migliorare le proprietà termiche.

Le attività sono state condotte presso i laboratori del centro ENEA della Casaccia con il contributo delle Università di Perugia, di Padova e di Trento.

b.1 Sviluppo di un sistema di accumulo per impianti solari ad alta temperatura alimentati con fluido gassoso

Nell'ambito delle attività di ricerca del PAR 2012, sono state analizzate soluzioni impiantistiche alternative per un impianto solare termodinamico ad alta temperatura a collettori parabolici lineari. Tra le varie soluzioni è stata studiata la possibilità di utilizzare un fluido gassoso come fluido termovettore per alimentare il campo solare e produrre energia elettrica tramite un ciclo termodinamico Brayton. Sono stati analizzati diversi gas potenzialmente utilizzabili per la raccolta di calore solare ad alta temperatura e pressione: CO_2, N_2, He e aria secca. La scelta del fluido ottimale è stata fatta sulla base di considerazioni tecnico-economiche, che hanno permesso di stabilire che l'aria secca è la soluzione più vantaggiosa per questa applicazione. Sono state quindi analizzate le possibili

configurazioni di impianto che permettono di migliorare il rendimento del ciclo termodinamico di questo fluido. Tenendo conto che per un impianto solare l'accumulo termico è la soluzione impiantistica che permette di dare continuità alla produzione di energia elettrica anche in assenza di radiazione solare, l'obiettivo delle attività di ricerca del PAR 2013 è stato di studiare un sistema di accumulo termico innovativo, a calore sensibile, basato sull'utilizzo di materiale solido in forma di sfere (pebble bed), racchiuso in opportuni contenitori, per accumulare calore ad alta temperatura e pressione (almeno 550 °C e 80 bar).

La Figura 167 mostra lo schema del ciclo Brayton in cui sono integrate tutte le soluzioni impiantistiche che a parità di massima temperatura di esercizio T3, permettono di migliorare il rendimento termodinamico. E' un ciclo chiuso con rigenerazione, compressione inter-refrigerata ed espansione frazionata in turbina con riscaldamento intermedio. La pressione di esercizio è di circa 80 bar mentre la temperatura massima è di circa 550°C mentre quella minima è di 20°C.

La Figura 168 mostra invece la configurazione di un impianto solare ibrido in grado di realizzare le trasformazioni termodinamiche mostrate in Figura 167. Nel layout di Figura 168 sono indicate le posizioni dei componenti principali dell'impianto, compresi la caldaia di backup (H) e il sistema di accumulo termico con materiale solido (gli elementi di accumulo sono indicati con la lettera E).

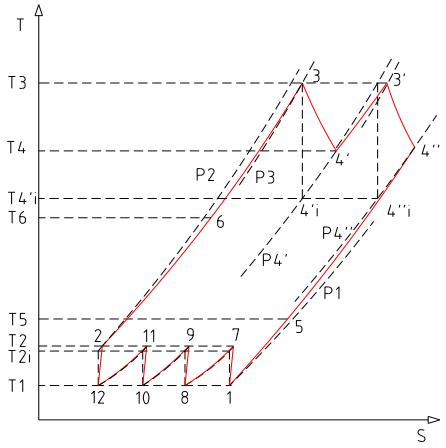


Figura 167. Diagramma qualitativo del ciclo chiuso con rigenerazione, compressione con inter-refrigerazione ed espansione frazionata in turbina con riscaldamento ripetuto

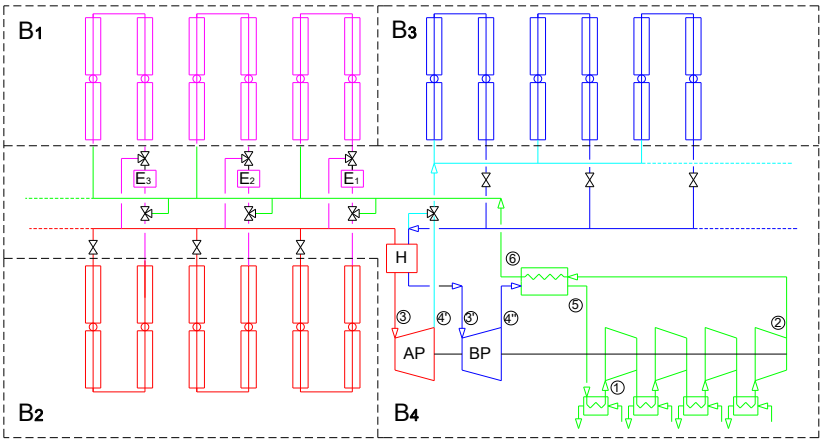


Figura 168. Schema a blocchi dell'impianto solare di riferimento con accumulo a materiale solido

L'impianto solare può essere suddiviso in 4 blocchi:

B1. il blocco B1 è costituito dalle stringhe di collettori solari che hanno la funzione di concentrare sui tubi assorbitori l'energia raggiante assorbita dall'aria compressa e successivamente trasferita al materiale ceramico stivato negli elementi di accumulo;

B2. il blocco B2 è costituito dalle stringhe di collettori solari alimentate dall'aria che fuoriesce dagli elementi di accumulo. L'aria che entra in B2 ha una pressione di circa 79 bar (sufficientemente elevata per l'espansione in turbina) e quindi può essere preriscaldata ad almeno 550°C dalla radiazione solare concentrata e successivamente inviata in caldaia per aumentare la temperatura al valore T3 di figura 1. L'aria ad alta pressione e temperatura, può essere quindi inviata nella sezione di AP della turbina, per espandere e produrre energia elettrica nelle ore di funzionamento diurno dell'impianto;

B3. il blocco B3 è costituito dalle stringhe di collettori solari che risurriscaldano ad almeno 550°C l'aria che fuoriesce dalla sezione di AP della turbina. L'aria che esce dal blocco B3 aumenta ulteriormente la temperatura nella caldaia, per raggiungere di nuovo la temperatura T3 ed espandere nella sezione di BP della turbina;

B4. il power block (turbina, scambiatore di calore rigenerativo, compressore inter-refrigerato, caldaia di backup, tubazioni di mandata e di ritorno dell'aria compressa, valvole).

L'inserimento della caldaia nel ciclo termodinamico è fondamentale per diversi motivi:

- migliora il rendimento del ciclo termodinamico (la caldaia permette di aumentare la temperatura d'ingresso dell'aria in turbina e quindi l'area del ciclo termodinamico);
- aumenta il fattore di carico dell'impianto (l'impianto può produrre a piena potenza anche nel periodo invernale in cui la radiazione solare è scarsa);
- migliora la continuità della produzione e l'efficienza del sistema di accumulo (per preriscaldare l'aria che alimenta la caldaia, si può utilizzare anche il calore accumulato a temperatura inferiore rispetto alla temperatura minima richiesta per l'espansione dell'aria nella sezione AP della turbina. Senza la caldaia, questo calore sarebbe inutilizzabile e rimarrebbe immagazzinato come calore residuo nell'elemento di accumulo).

Per studiare il sistema di stoccaggio di calore ad alta temperatura e pressione, è stato realizzato un primo disegno dell'elemento di contenimento del materiale ceramico (Figura 169), necessario per lo sviluppo di un modello del calcolo delle prestazioni del sistema di accumulo.

L'obiettivo è mettere a punto una metodologia di progettazione utilizzando i risultati delle simulazioni dei processi di accumulo e di recupero di calore dall'elemento di accumulo di riferimento. Per questa tipologia di impianti, l'accumulo termico si potrebbe realizzare con una serie di scambiatori di calore a fascio tubiero, contenenti allumina sferoidale con diametro medio di circa 5 mm. Gli elementi di accumulo sarebbero distribuiti nel campo solare e posizionati a valle delle stringhe di collettori solari destinate a raccogliere l'energia solare concentrata per l'accumulo termico. Questa soluzione oltre ad ottimizzare l'aspetto impiantistico riduce sensibilmente i costi di fabbricazione e l'impatto ambientale.

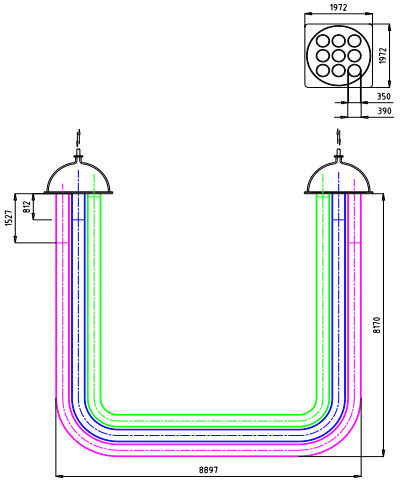


Figura 169. Geometria di riferimento dell'elemento di accumulo di calore con materiale solido

L'elemento di accumulo di riferimento ha una lunghezza di 20 m ed è costituito da 9 tubi d'acciaio inossidabile AISI 316 con diametro interno di 350 mm, alimentati con aria ad almeno 550 °C durante la fase di accumulo e a circa 120 °C, durante la fase di recupero del calore accumulato.

Per valutare la capacità di accumulo sono state definite le equazioni alla base del modello di calcolo, che sono state implementate in un programma di simulazione dei transitori di accumulo e di recupero dell'energia termica accumulata. E' stata simulata la fase del primo accumulo, considerando il materiale ceramic0 a temperatura iniziale uniforme di 20 °C, con l'aria di alimentazione a 80 bar e 550 °C e portata di ≅1,54 kg/s.

La Figura 170 mostra la distribuzione della temperatura nel materiale ceramico relativa a questo transitorio di accumulo di calore, in funzione della posizione e del tempo.

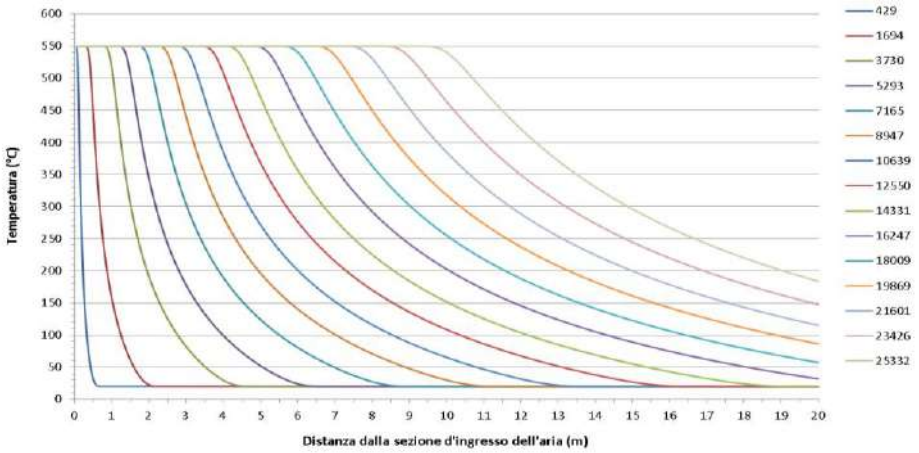


Figura 170. Temperatura del ceramico durante il primo accumulo di calore

La fase di accumulo termina quando la temperatura del materiale ceramico nella sezione di uscita è di circa 180 °C, Il tempo di accumulo è di circa 7 h, con un'energia accumulata pari a circa 16 GJ (circa 4,4 MWh).

Lo sviluppo della metodologia di progettazione è tuttora in corso ed è centrata sulla valutazione della quantità di calore effettivamente utilizzabile per la produzione di energia elettrica e quindi sulla valutazione dell'efficienza del sistema di accumulo, definita dal rapporto tra l'energia termica recuperabile e l'energia termica immagazzinata.

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda al rapporto tecnico RdS/PAR2013/225.

b.2 Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell'intervallo di temperatura 200-250°C

Un mezzo di accumulo a calore latente con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C è stato selezionato, prodotto nelle opportune quantità, e completamente caratterizzato, con particolare riferimento alla diffusività/ conducibilità termica, alla sua stabilità nel tempo (durabilità) ed a tutte quelle proprietà fisiche e termo-meccaniche necessarie (es. densità, variazione di volume al cambio di fase, coefficiente di dilatazione termica, pressione di vapore), nonché alla sua compatibilità con i materiali di contenimento (corrosione di acciai di tipo AISI 316).

Particolare attenzione è stata posta nello studio 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).

Le attività ENEA hanno riguardato la selezione e caratterizzazione del mezzo di accumulo e la sua compatibilità chimica con i materiali di contenimento. Le attività connesse alla sintesi, ai protocolli di miscelamento, alla metodologia di produzione e alla sua effettiva produzione sono state svolte dall'Università di Perugia.

La principale richiesta per la realizzazione delle prove sperimentali previste nel PAR2013 è quella di avere un mezzo di accumulo a cambiamento di fase con una temperatura di fusione di 200-250 °C e buone caratteristiche di capacità e diffusività termica. Facendo riferimento al lavoro svolto durante la precedente annualità, è stata individuata la miscela di sali costituita da nitrati di sodio ($NaNO_3$ 60%p e potassio (KNO_3 40%p), comunemente conosciuta come "sali solari" come quella adatta, sulla base della temperatura di fusione richiesta, al tipo di applicazione prevista. A tale miscela (PCM) può essere aggiunto l'1% di una miscela di nanoparticelle di silica e allumina (SiO_2-AlO_2). Questo nuovo PCM (nanoPCM) ha mostrato migliori caratteristiche termiche come accade, ad esempio, per la capacità termica e il calore latente di fusione. Presumibilmente ciò dovrebbe succedere anche per la conducibilità termica, cosa, ad oggi, ancora da verificare a causa della difficoltà della misura stessa.

E' stata analizzata la compatibilità chimica della miscela di sali nitrati selezionata con due acciai inossidabili, AISI 316 Ti e AISI 430, candidati alla realizzazione degli accumulatori e della sezione di prova. La composizione di detti acciai è riportata in Tabella 59.

Tabella 59. Composizione chimica limite (%wt) per gli acciai AISI 430 ed AISI 316 Ti

Classe	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Ti
AISI 430	0,12	1	0,04	0,03	1	–	16–18	–	–
AISI 316 Ti	0,08	2	0,045	0,015	1	10,5-13,5	16,5-18,5	2-2,5	5 x C min

Le prove sperimentali di corrosione statica in condizioni statiche isoterme, sono state eseguiti mediante l'immersione di provini dei due acciai lucidati in un crogiolo di acciaio inossidabile. Il tempo di contatto è stato, in entrambi i casi di 2000 h, e la temperatura di 550 °C. Alla fine del tempo di immersione, i campioni sono stati estratti, puliti e pesati. Il processo di ossidazione è macroscopicamente osservato misurando l'aumento di peso dei campioni di ogni acciaio.

Analisi al SEM sono state utilizzate per caratterizzare la morfologia della superficie della scaglia di ossido ed una sonda EDS è stata impiegata per determinare la composizione elementare della scaglia e della lega; lo spessore dello strato di ossido è stato misurato a partire dall'interfaccia ossido/liquido, fino al bulk della lega in cui la concentrazione di ferro corrisponde a quella della lega iniziale. Tre campioni sono stati considerati per ciascun materiale AISI 430 ed AISI 316 Ti.

In generale si riscontra un aumento del peso dei campioni dei due acciai a causa della formazione dello strato di ossido; dopo 2000 h non si sono ancora verificati fenomeni di distacco della scaglia di ossido dalla superfice

dell'acciaio o fenomeni di sfogliatura. L'analisi della compatibilità chimica del PCM con alcuni acciai di possibile utilizzo (AISI 430 e AISI 316) ha evidenziato che: l'AISI 430 dopo 2000 h a 550°C in bagno di sali fusi presenta degli svantaggi evidenti rispetto all'AISI 316 Ti, nelle medesime condizioni di test di ossidazione, in quanto si verificano fenomeni di sfogliatura superficiale della scaglia di ossido, e sono presenti lievi penetrazioni transgranulari dell'ossido all'interfaccia con l'acciaio. In ragione di ciò, sebbene la temperatura operativa sia inferiore a quella cui sono stati condotti i test, si consiglia l'uso dell'AISI 316 per la realizzazione degli accumulatori e della sezione di prova.

Sintesi e caratterizzazione di nano-PCM

Nella precedente annualità, l'Università di Perugia aveva identificato come migliore nanoPCM una miscela binaria di sali ($NaNO_3$ -KNO_3) cui si è aggiunta una piccola quantità (1%wt) di nanoparticelle di SiO_2 e Al_2O_3 prodotto con un metodo basato sulla miscelazione ad alta temperatura. I campioni erano stati preparati aggiungendo le nanoparticelle alla miscela di sali con un estrusore bivite co-rotante (modello Xplore 15 Compounder della DSM), il quale viene generalmente utilizzato per la miscelazione e l'estrusione dei polimeri. Il migliore nanoPCM era risultato quello miscelato a 300 °C per 30 min con la velocità delle viti di 200 rpm.

A seguito degli ottimi risultati ottenuti con il microestrusore bivite, si è pensato di utilizzare lo stesso metodo per la produzione di maggiori quantità (essendo il microestrusore limitato ad una portata di 20 g). Sono state sviluppate diverse metodologie di miscelazione ad alta temperatura ed è stato utilizzato anche un metodo di miscelazione in soluzione acquosa. I materiali PCM base e nanoPCM prodotti sono stati caratterizzati attraverso calorimetria a scansione differenziale (DSC)e SEM.

E stata determinata la capacità termica mediante DSC. Il campione è stato ricavato pesando una quantità di circa 12 mg di materiale (nanocaricato e non) con una bilancia di precisione utilizzando un porta-campione in alluminio.

I campioni sono stati sottoposti poi al seguente ciclo termico:

1° step: 150°C per 5 min
2° step: 150°C - 300°C a 20°C/min
3° step: 300°C per 5 min
4° step: 300°C - 150°C a 20°C/min.

Il ciclo è stato effettuato sei volte per la ripetibilità del test e per annullare la storia termica del campione. I materiali dopo essere stati sottoposti ai cicli termici al DSC sono stati analizzati al SEM per valutare la dispersione delle nanoparticelle nel sale. Il PCM base è stato ottenuto a partire dai sali separati miscelando il 60%wt costituita da nitrato di sodio ($NaNO_3$) e il 40%wt di nitrato di potassio (KNO_3).

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 60 e utilizzati in seguito come confronto con i nanoPCM realizzati.

Tabella 60. Calore specifico, calore di fusione e temperature di fusione per il sale base

	Cp Medio Fase Solida (J/g°C)	Cp Medio Fase Liquida (J/g°C)	ΔH fusione (J/g)	T onset (°C)	T fusione (°C)
PCM base in forno (1 ciclo)	1,585	1,623	113,00	219,87	229,67
PCM base in aria	1,411	1,472	103,47	219,57	226,09

In particolare, il PCM base è stato posto in forno e poi analizzato e questo valore del calore specifico è stato preso come riferimento per i nanoPCM prodotti ad alta temperatura (ossia con PCM allo stato liquido). L'altro tenuto in aria è stato invece utilizzato come riferimento per i nanoPCM sviluppati in soluzione acquosa.

Messa a punto del metodo di produzione del nanoPCM

Sono stati analizzati diversi metodi di produzione del nanoPCM che possono essere raggruppati in due categorie: "miscelazione ad alta temperatura" e "miscelazione in soluzione acquosa".

Miscelazione ad alta temperatura

Miscelazione con estrusore

L'idea iniziale è stata di riprodurre su vasta scala lo stesso procedimento che aveva dato buoni risultati su quantità minime. A questo scopo è stato scelto un estrusore bivite modello MD30 della Bausano. Come primo passaggio sono stati introdotti circa 3 kg del PCM base polverizzati e mescolati. L'estrusore è stato poi alimentato tramite la

tramoggia e impostata la temperatura di 300 °C in modo da avere una prima miscelazione allo stato solido ed una seconda oltre la temperatura di fusione, ricercando la migliore dispersione possibile delle nanoparticelle all'interno della miscela di sali. Dopo un primo momento dove la miscela di sali allo stato liquido ha effettivamente completato il ciclo all'interno del condotto nonostante la portata in uscita fosse fin dall'inizio molto minore della portata in entrata, il processo si è fermato. La miscela liquida ha cominciato a fuoriuscire dall'apertura di sfiato, rendendo così impossibile proseguire con l'utilizzo dell'estrusore. L'assenza di attrito, quindi di sforzi di taglio, ha reso la rotazione delle viti inutile sia dal punto di vista del trasporto del materiale sia da quello della miscelazione. Inoltre, il repentino passaggio dallo stato solido allo stato liquido ha bloccato il passaggio della miscela. Sono stati quindi studiati altri metodi di miscelazione ad alta temperatura.

Miscelazione con Dispermat

Il miscelatore da laboratorio Dispermat è un apparecchio utilizzato per la miscelazione di elementi chimici liquidi tramite rotazione di un disco sfrangiato perpendicolarmente alla propria superficie con delle alette.

Vista la consistente quantità di materiale richiesta per l'utilizzo presso l'ENEA si è stabilita una produzione di 500 g di nanoPCM alla volta (495 g di PCM e 5 g di nanoparticelle). Le miscele sono state lasciate in muffola per diverse ore.

Inizialmente, si è scelto di produrre il nanoPCM utilizzando parametri il più possibile simili a quelli usati nel microestusore. I tempi scelti pertanto sono stati 15 e 30 minuti, mentre la velocità di miscelazione di 100 e 200 rpm è risultata subito troppo bassa e quindi si è passati ad una velocità ritenuta buona di 500 rpm (Tabella 61).

Tabella 61. Parametri di miscelazione con Dispermat

nanoPCM	Quantità (g)	Parametri di miscelazione		
		T mix (°C)	*Velocità (rpm)*	*Tempo di mixing (min)*
1D	500	370	500	30
2D	500	370	500	30
3D	500	370	700	30
4D	500	370	500	15
5D	500	370	500	30
6D	500	370	500	30
7D	500	370	500	30
8D	20	370	200	30

Nella Tabella 62 è riportato il calore specifico in funzione della temperatura (in fase solida e in fase liquida) per tutti i nanoPCM prodotti con Dispermat.

Tabella 62.Calori specifici dei nanoPCM prodotti con Dispermat 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)	1,585	-----	1,623	-----
1D	1,559	-1,6	1,560	-4,0
2D	1,496	-5,6	1,520	-6,3
3D	1,571	-0,9	1,575	-3,1
4D	1,305	-17,7	1,260	-22,5
5D	1,515	-4,4	1,466	-9,8
6D	1,451	-8,4	1,445	-11,1
7D	1,508	-4,9	1,519	-6,5
8D	1,662	4,9	1,691	4,1

Le immagini al SEM sono state effettuate sui primi nanoPCM prodotti ossia quelli con Dispermat, ed hanno confermato che il mancato aumento del calore specifico è da imputare ad una non perfetta dispersione delle nanoparticelle. In Figura sono riportate alcuni dei nanoPCM analizzati in cui si vedono agglomerati di nanoparticelle. Tutti i nanoPCM (prodotti anche con gli altri metodi) che hanno mostrato un basso calore specifico hanno mostrato al SEM simili aggregati.

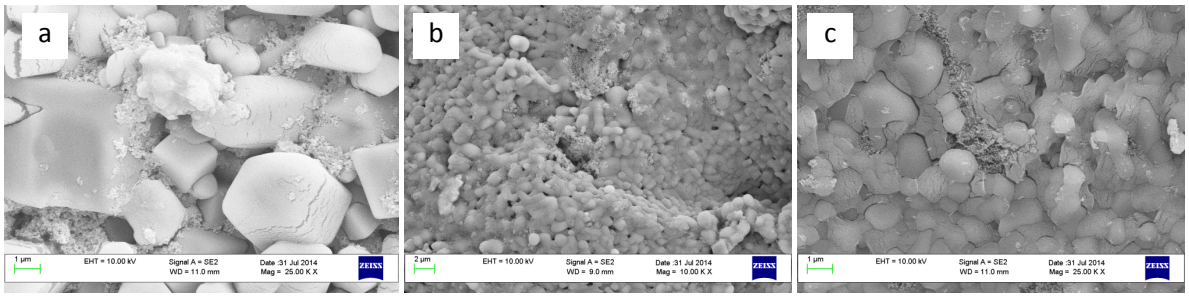


Figura 171.immagini SEM della dispersione ottenuta con il 1° metodo tramite Dispermat a) nnoPCM 1D; b) nanoPCM 4D; c) nanoPCM 6D

Miscelazione con agitatore a palette

Con questo tipo di miscelazione è stato utilizzato un agitatore ad asta Heidolph RZR 2041. L'asta utilizzata termina con delle palette in grado di creare una maggiore agitazione, le velocità utilizzate sono state tali da produrre un adeguato vortice al limite della turbolenza. La preparazione dei campioni da miscelare con l'agitatore a palette è stata fatta esattamente come per la miscelazione con Dispermat ottenendo campioni di 500 g di nanoPCM e sono stati utilizzati poi gli stessi contenitori per l'inserimento in muffola a 350°C.

Le miscele realizzate sono riportate in Tabella 63 e i risultati in Tabella 64.

Tabella 63 –Parametri di miscelazione con l'agitatore meccanico.

nanoPCM	Quantità (g)	Parametri di miscelazione		
		T mix (°C)	Velocità (rpm)	Tempo di mixing (min)
1A	500	370	500	30
2A	500	370	200	30

Tabella 64. Calori specifici dei nanoPCM prodotti con Agitatore 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)	1,585	-----	1,623	-----
1A	1,643	3,7	1,557	-4,1
2A	1,566	-1,2	1,560	-3,9

Miscelazione con agitatore magnetico

I risultati non soddisfacenti dei primi due metodi hanno condotto ad un ulteriore tentativo di miscelazione che prescindesse quasi del tutto dal movimento rotante ma che fosse in grado di creare forte turbolenza. È stato scelto di utilizzare un agitatore magnetico (magnetic stirrer) dotato di riscaldamento per mezzo di una resistenza elettrica posta sotto il piano d'appoggio che può arrivare a 370 °C. L'agitazione avviene mediante la rotazione di un'ancoretta magnetica sul fondo di un contenitore sul quale agisce un campo magnetico ad una velocità di 1200 rpm.

Tabella 65. Parametri di miscelazione con agitatore magnetico

nanoPCM	Quantità (g)	Parametri di miscelazione		
		T mix (°C)	*Velocità (rpm)*	*Tempo di mixing (min)*
1M	20	370	1200	30
2M	40	370	1200	30
3M	100	370	1200	30

Tabella 66. Calori specifici dei nanoPCM prodotti con agitatore magnetico 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)	1,585	-----	1,623	-----
1M	1,671	5,4	2,164	33,2
2M	1,545	-2,5	1,591	-2,1
3M	1,458	-8,0	1,471	-9,5

Miscelazione in soluzione acquosa

Dopo aver riscontrato dei valori delle caratteristiche termiche dei nanoPCM sviluppati ad alta temperatura, inferiori rispetto alle aspettative, si è pensato di miscelare sali e nanoparticelle in soluzione acquosa con un metodo simile a quello sviluppato nel PAR 2012. In quel caso i risultati erano stati molto buoni, tuttavia quel tipo di miscelazione richiedeva quantitativi elevati di acqua. Pertanto è stato sviluppato un metodo simile aumentando la concentrazione di sali e nanoparticelle disciolte in acqua. In particolare si è pensato di aumentare la concentrazione dei sali fino a 100, 300 e 500 g/L. Ciò ha consentito di produrre una quantità più elevata di nanoPCM con un quantitativo di acqua non troppo elevato.

Il metodo utilizzato consiste nei seguenti passi:

1. il nitrato di potassio e il nitrato di sodio e le nanoparticelle sono stati misurati con una bilancia di precisione;
2. tutti i prodotti chimici sono stati poi sciolti in 1L di acqua distillata;
3. questa soluzione di acqua contenente l'1% di nanoparticelle nella miscela di sali, è stata miscelata utilizzando diversi dispositivi (ultrasuoni, stirrer, dispermat e agitatore);
4. la soluzione acquosa è stata poi fatta evaporare in forno a 300 °C fino a completa evaporazione dell'acqua;
5. il nanoPCM così prodotto è stato lasciato raffreddare fino a completa solidificazione e raffreddamento;
6. un campione secco di pochi milligrammi è stato prelevato dalla polvere ottenuta macinando varie parti della nanoPCM solido ed è stato testato al DSC.

La Tabella 67 riporta la descrizione dei nanoPCM ottenuti in base a diversi parametri di miscelazione e tipo di miscelatore utilizzato (S=soluzione acquosa, M=magnetic stirrer, A=agitatore, D=Dispermat). La Tabella 69 riporta i risultati.

Tabella 67. Parametri di miscelazione in soluzione acquosa

NanoPCM	Quantità (g/L)	Parametri di miscelazione		
		Miscelatore	***Velocità (rpm)***	***Tempo di mixing (min)***
1SM	100	Ultrasuoni	-------	180
		Magnetic stirrer	-------	100
2SM	100	Magnetic stirrer	-------	100
3SM	500	Magnetic stirrer	-------	100
4SA	100	Agitatore	500	100
5SA	300	Agitatore	500	100
6SA	500	Agitatore	500	100
7SD	100	Dispermat	800	100

Tabella 68. Calori specifici dei nanoPCM (metodo in soluzione acquosa) confrontati con il PCM base

nanoPCM	Cp Medio Fase Solida (J/g°C)	Incremento Percentuale (%)	Cp Medio Fase Liquida (J/g°C)	Incremento Percentuale (%)
PCM base in aria	1,411	----	1,472	----
1SM	1,717	21,7	1,668	13,3
2SM	1,262	10,6	1,505	2,2
3SM	1.529	8,4	1.435	-2,5
4SA	1,818	28,8	1,675	13,8
5SA	1,620	14,8	1,564	6,3
6SA	1,476	4,6	1,403	-4,7
7SD	1,768	25,3	1,728	17,4

Analisi dei risultati e conclusioni

A partire da un PCM base costituito da sale $NaNO_3$-KNO_3 (T_m=220 °C) e da nanoparticelle di SiO_2-Al_2O_3 (2-200 nm) aggiunte all'1%p sono stati prodotti diversi nanoPCM con diversi metodi e caratterizzati.

La miscelazione è avvenuta per entrambi i sali ad alta temperatura e in soluzione acquosa. I valori medi del calore specifico eseguiti con il Dispermat mostrano un peggioramento delle capacità termiche dei nanoPCM rispetto al solo PCM. L'unico nanoPCM per il quale è stato riscontrato un miglioramento di capacità termica è stato quello costituito da 20 g e miscelato a 200 rpm per 30 minuti (nanoPCM 8D) con un incremento del 5% in fase solida e del 4% in fase liquida. Tra i nanoPCM miscelati con Dispermat il migliore è risultato il nanoPCM da 20 g (8D) con un incremento del 5 e del 4% del calore specifico in fase solida e liquida. Anche tra i nanoPCM miscelati con magnetic stirrer il migliore è risultato il nanoPCM da 20 g (1M) con un miglioramento del 5 e del 33% (anche se questo 33% si riduce a quando viene considerata solo la parte più costante del calore specifico che avviene a più alte temperature).

Tra i nanoPCM miscelati con agitatore il migliore è risultato il nanoPCM da 500 g (1A) con un miglioramento del 3% allo stato solido. In soluzione acquosa i risultati sono stati migliori con maggiori quantità prodotte fino a 300 g. Il migliore in assoluto (nanoPCM 4SA) è risultato quello costituito da 100 g e miscelato con agitatore (29 e 14% di aumento del calore specifico). Pertanto la produzione verrà fatta in soluzione acquosa.

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda ai rapporti RdS/PAR2013/226 e RdS/PAR2013/227.

b.3 Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione

Qui di seguito è descritta l'attività ENEA relativa allo studio ed alla progettazione di un sistema elementare di accumulo termico a cambiamento di fase funzionante a media temperatura (circa 250 °C) e della sezione di prova necessaria alla verifica delle condizioni di scambio termico che si instaurano. In particolare, si è scelto un tipo di scambiatore di riferimento e se ne è studiato il comportamento attraverso opportuni modelli di simulazione e si è progettato sia il sistema di accumulo elementare che la relativa sezione di prova.

In particolare, si è proceduto a:

- scegliere un tipo di accumulatore a calore latente da realizzare: in questa fase il tipo di scambiatore da utilizzare è di tipo "tubo e guscio" con un fluido termovettore (Heat Transfer Fluid, HTF) che scorre internamente al tubo;
- sviluppare dei modelli di simulazione dei transitori termici: sono stati sviluppati una serie di modelli numerici per la simulazione del sistema accumulo elementare a calore latente, sia di tipo semplificato che di dettaglio, per effettuare analisi termiche ed indagini parametriche del componente, e prevede rne le prestazioni;
- progettare dei sistemi di accumulo elementari: sulla base delle analisi numeriche effettuate si sono dimensionate le varie tipologie di accumulo elementare da indagare e si sono preparati i disegni da poter inviare in officina;
- progettare la sezione di prova: sulla base delle caratteristiche termiche degli accumulatori elementari progettati si è eseguita la progettazione di una sezione di prova che rispondesse alle esigenze termo-fluidodinamiche connesse alle fasi di carico e scarico del sistema di accumulo.

Selezione del tipo di accumulo

Un contenimento per PCM dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

1. soddisfare i requisiti di resistenza, flessibilità, resistenza alla corrosione e stabilità termica;
2. agire come barriera protettiva del PCM dall'interazione nociva con l'ambiente;
3. fornire una sufficiente superfice per il trasferimento di calore;
4. assicurare stabilità strutturale and facile manutenzione.

I tipi di contenitori studiati sino ad oggi sono ad accumulo massivo in scambiatori di calore a tanca, per macroincapsulazione e per microincapsulazione.

Il problema tecnologico maggiore per la realizzazione di sistemi di accumulo a calore latente ad alta temperatura è l'insufficiente conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase disponibili. I materiali più idonei forniscono una conducibilità di 0,5-1 W/m-K. Pertanto, il processo di progettazione dello scambiatore di calore è

dominato dal compito di individuare soluzioni efficaci per aumentare l'effettiva conducibilità termica all'interno del materiale di accumulo.

Alla luce di un'indagine bibliografica eseguita, è risultato evidente che il tipo di accumulatore termico a calore latente di forma più semplice e, quindi, facilmente realizzabile è quello di tipo "shell & tube", in cui il fluido termovettore scorre all'interno del tubo.

Naturalmente, se il mezzo di accumulo non ha delle caratteristiche di diffusività termica sufficienti a garantire dei tempi di carica del sistema contenuti, sarà necessario prevedere un incremento della superficie di scambio termico attraverso l'utilizzo di un tubo opportunamente alettato in luogo di uno liscio (Figura 172).



Figura 172. Esempio di tubo alettato da inserire all'interno di un contenitore (guscio) cilindrico

Progettazione degli accumulatori elementari

Gli elementi di accumulo a PCM del tipo "shell & tube" sono costituiti in generale da un tubo di acciaio al cui interno scorre il fluido termovettore, esternamente al tubo è posto un contenitore metallico cilindrico destinato a contenere il materiale di accumulo a cambiamento di fase (Figura 173). La dimensione del tubo (diametro), influenza le modalità di scambio termico tra fluido termovettore e tubo e determina la superficie di scambio termico tra tubo e materiale di accumulo.

La dimensione esterna del contenitore metallico è funzione della quantità di materiale di accumulo utilizzato, ovvero della capacità termica richiesta all'elemento, ed influenza i tempi di carica relativa all'elemento stesso, dipendenti dalla bassa diffusività del mezzo di accumulo. Spesso per aumentare le capacità di trasmissione termica del calore nel mezzo di accumulo si utilizzano diversi metodi di promozione della diffusività termica. Uno di questi consiste nell'utilizzo di un tubo alettato invece che liscio (Figura 173b). Entrambe le configurazioni sopra descritte sono state prese in considerazione.

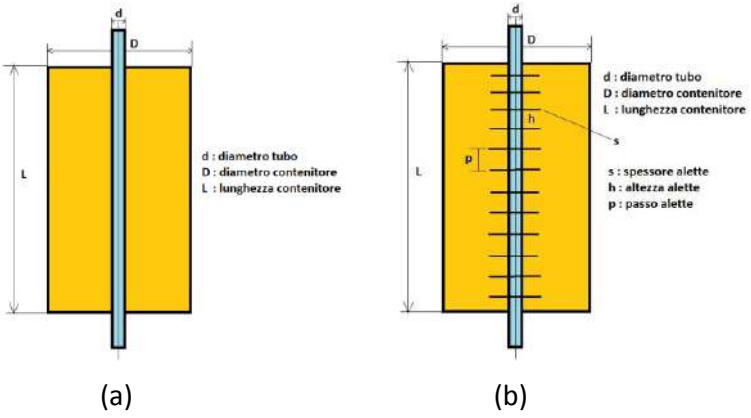


Figura 173. Schema di elemento di accumulo termico guscio-tubo (a) senza alette e (b) con alette.

Sulla base di un'analisi di sensibilità sui principali parametri del sistema e di una successiva valutazione del suo comportamento termico, basate sull'utilizzo di modelli FEM semplificati (codice Cast3M), si è dimensionato un sistema con le seguenti caratteristiche:

Dimensioni tubo:	Raggio esterno tubo: 16 mm	Spessore tubo: 1 mm
Dimensioni guscio:	Raggio interno guscio: 35 mm Altezza guscio: 500 mm	Spessore guscio: 2 mm
Dimensioni alette:	Passo delle alette: 10 mm Altezza delle alette: 10 mm	Spessore delle alette: 0.4 mm
Intervallo operativo:	Temperatura minima: 200 °C Temperatura massima: 260 °C Temperatura di fusione: 225 °C - sali solari	

Tabella 69. Risultati del confronto tra sistemi di accumulo a cemento e PCM

RISULTATI	Caso A	Caso B
Capacità lineica (Wh/m)	397,3	393,8
Capacità volumetrica (kWh/m^3)	109	109
Capacità massica (Wh/kg)	58,9	58,9
Capacità per L=500 mm (Wh)	197	195
Tempo di carica (95%) (h)	5,3	3,3
Perc, calore accumulato (%)	99,98	100,0

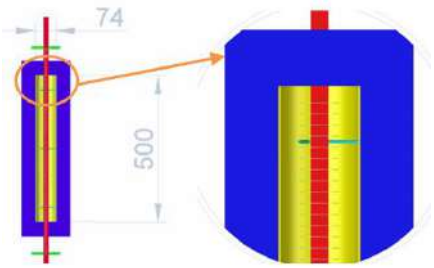


Figura 174. Spaccato dell'elemento di accumulo con particolare dell'interno

Analisi del comportamento termo-dinamico

Dopo aver eseguito il dimensionamento e la progettazione dell'elemento di accumulo termico, utilizzante materiali a cambiamento di fase, si sono sviluppati ed utilizzati dei modelli più complessi per prevedere e analizzare il suo comportamento termico. In particolare, si è proceduto a:

- simulare il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi FEM 2D assialsimmetriche (codice Cast3M);
- simulare il comportamento termico transitorio dell'intero elemento di accumulo attraverso analisi CFD 2D assialsimmetriche. In esse si è portato in conto l'effetto dovuto alla gravità sul PCM in fase liquido e quindi valutato l'influenza di questo fenomeno convettivo sullo scambio termico (codice Fluent);
- simulare il comportamento termico transitorio attraverso analisi FEM semplificata (1D assialsimmetriche) dell'elemento di accumulo in cui sia stato introdotto un opportuno strato di coibente (codice Cast3M).

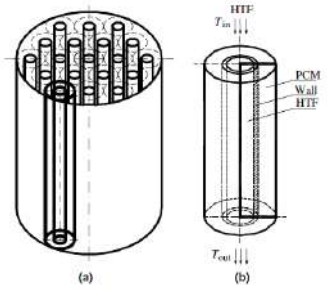


Figura 175. Sistema di accumulo completo (a) e a singolo tubo (b)

La principale grandezza presa in esame durante queste analisi, oltre la capacità termica del sistema, è il tempo di carico e scarico dell'elemento di accumulo. I principali risultati ottenuti sono i seguenti:

- La prima carica di un elemento di accumulo a tubo liscio dovrebbe essere di circa 3,5 ore (350 Wh forniti dal fluido di cui 285 stoccati nel PCM). Se, invece, il tubo è alettato, la prima carica avviene in circa 2,5 ore (340 Wh di cui 284 nel PCM).
- Durante la fase di carico effettivo dell'elemento a tubo liscio, tra 200 e 260°C, verranno accumulati circa 200 Wh di calore in un tempo superiore alle 4,5 ore. Un tempo analogo è necessario per la fase di scarico del sistema, per un totale di circa 10 ore. Nel caso di un elemento con tubo alettato, l'energia termica accumulata è leggermente inferiore (190 Wh) come pure, ma in modo più marcato i tempi necessari (3 ore per il carico e 7 ore per il carico-scarico).
- Nel caso di un elemento di accumulo con tubo alettato, la presenza delle alette riduce la massa ed il volume del PCM ed incrementa quelli del tubo. Di conseguenza, la capacità termica dell'elemento sarà leggermente inferiore (5%) ma la diffusività termica migliore ed i tempi di carico/scarico ridotti (16%).
- Se si tiene in conto, attraverso delle analisi CFD di un elemento di accumulo a tubo liscio, anche dell'effetto "gravitazionale" indotto sul PCM in fase fluida e, quindi, degli eventuali moti convettivi che si potrebbero instaurare, si ottiene un tempo di carico di circa 5 h. In questo caso, si può dire che, sebbene la convezione naturale, che si instaura nella fase parzialmente liquida del PCM, influisca in maniera importante sulle dinamiche relative alla fusione ed alla fase di carica del sistema, essa non ha particolare influenza sui tempi di carica dello stesso.
- Il sistema sin qui analizzato è stato supposto perfettamente adiabatico verso l'ambiente esterno. In realtà, le perdite verso l'esterno non sono nulle, ma soltanto limitate utilizzando una coibentazione di opportuno spessore. Uno strato di lana di roccia di circa 100 mm dovrebbe garantire che, al raggiungimento dello stazionario relativo alla fase di carico del sistema, tutto il PCM impiegato sia arrivato alla fusione.
- La presenza del coibente, conduce a tempi di carico del sistema molto lunghi e, di conseguenza, alla impossibilità di raggiungere lo stazionario (o il 95% del carico massimo) in tempi non eccessivi. Un sistema a tubi lisci, con la presenza di coibentazione, dopo circa 5 ore arriva a circa il 60-70% del carico massimo.

- Per migliorare le prestazioni "dinamiche" del sistema di accumulo, sembra più indicato, piuttosto che incrementare ulteriormente lo spessore del coibentazione, inserire opportuni sistemi di promozione della diffusività termica (es. alette).
- Infine, in questo contesto abbiamo preso in esame un PCM "semplice" come i sali solari. Nel caso, invece, supponessimo di utilizzare un PCM con nanoparticelle aggiunte la situazione potrebbe essere molto diversa. Questo tipo di mezzo di accumulo avrebbe una capacità termica sicuramente maggiore ed una diffusività che, invece, potrebbe essere sempre insufficiente: ciò potrebbe condurre ad un sistema di accumulo con maggiore densità di energia ma con tempi di carica maggiori di quanto qui previsto.

Progettazione della sezione di prova

La progettazione della sezione di prova è stata eseguita con l'ausilio del software Autocad. L'utilizzo di tale software ha permesso oltre alla definizione dei disegni, anche un'analisi, in fase di pre-dimensionamento, che ha evidenziato le criticità nella sua realizzazione. La Figura 176 riporta una vista isometrica dell'impianto completo.

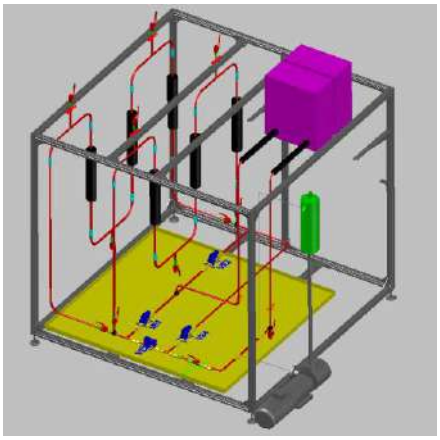


Figura 176. Vista 3D dell'impianto completo

L'attività ha comportato il dimensionamento ed il layout del piping, l'individuazione di valvole sia manuali che ad azionamento elettrico, l'individuazione di dispositivi di riscaldamento/raffreddamento del fluido termovettore, di circolazione dello stesso, di misura delle portate e delle temperature, di controllo del sistema, nonché delle procedure per la corretta esecuzione dei test sperimentali (fasi di ricircolo, prima carica, carico-scarico, etc.).

Le principali caratteristiche fisiche, a temperature prossime a quelle di normale esercizio, sono riportate nella Tabella 70.

Per approfondimenti sull'attività sopra descritta si rimanda al Rapporto Tecnico RdS/PAR2013/228.

Tabella 70. Principali caratteristiche fisiche alle temperature di esercizio dell'impianto

Temperatura [°C]	180	280
Portata in massa [kg/s]	0,15	0,14
Portata in volume [L/min]	10	10
Velocità [m/s]	1,08	1,08
Perdite di carico [bar]	0,43	0,40
Densità [g/L]	899,5	824,6
Viscosità [Pa s]	0,00106	0,00046
Capacità termica [J kg^{-1} K^{-1}]	2122	2492
Conducibilità termica [W m^{-1} K^{-1}]	0,107	0,097
Numero di Reynolds	12869	29655
Numero di Prandtl	21,02	11,82
Coefficiente di scambio termico con tubi puliti [W /(m^2K)]	940	1371
Coefficiente di scambio termico con tubi sporchi [W/(m^2K)]	809	1110

Tecniche di modellazione di moduli di accumulo contenenti micro capsule di PCM

L'attività, svolta dall'Università di Padova, ha riguardato uno studio preliminare sull'incremento di capacità termica nei sistemi di accumulo solidi, realizzati in calcestruzzo, con inclusioni di materiali a cambiamento di fase. Nello specifico è stata valutata la variazione del comportamento termico di questi compositi, al variare delle percentuali di inclusioni. A tale fine è stato sviluppato un codice ad elementi finiti HT (igrotermico) in grado di valutare il comportamento non lineare del calcestruzzo durante i cambiamenti di fase del PCM, soggetto alla storia di carico dell'impianto test progettato da ENEA.

Analisi transitorie termiche sono state realizzate considerando il composito, costituito da calcestruzzo con inclusioni di materiale a cambiamento di fase, tramite un processo di omogeneizzazione in cui si è assunta una distribuzione omogenea di PCM all'interno della matrice cementizia ottenuta durante la miscelazione del calcestruzzo fresco. E' stata inoltre investigata, sia in modo analitico che numerico, la variazione di resistenza meccanica di questa tipologia di materiale, sia a temperatura ambiente che durante un processo di riscaldamento.

Sono stati sviluppati modelli FEM termo-igro-meccanici tridimensionali in mesoscala, atti a rappresentare esplicitamente i principali componenti del calcestruzzo quali: pasta cementizia, aggregati grossolani, PCM ed ITZ in modo tale da descrivere il processo evolutivo del danno termico durante il funzionamento dell'impianto. I modelli in mesoscala hanno l'importante peculiarità di permettere di valutare effetti iperstatici che un materiale eterogeneo quale il calcestruzzo presenta durante il processo deformativo dovuto ad espansione termica, non visibili con classici modelli macroscopici.

Nell'ambito dello studio di sistemi di accumulo a calore sensibile con impiego di calcestruzzi speciali è stato realizzato da ENEA un piccolo impianto test di accumulo solido (Figura 177), realizzato da due elementi di calcestruzzo cilindrici, opportunamente coibentati, atti a immagazzinare calore rilasciato da un fluido termovettore circolante in una tubazione in acciaio che passa nell'asse dei cilindri

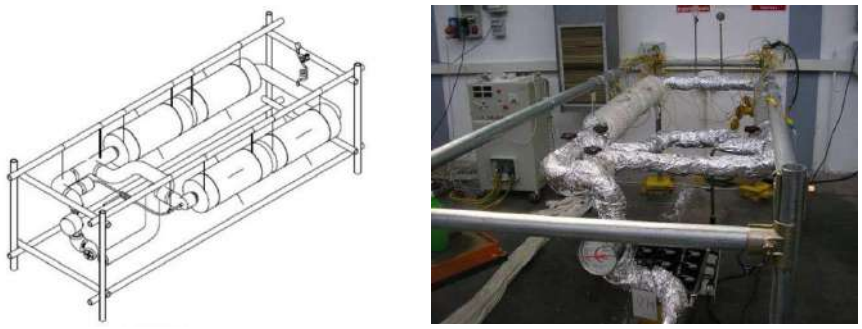


Figura 177. Schema di accumulo solido nell'impianto test

Partendo da questa schematizzazione si sono volute stimare le principali caratteristiche dell'impianto, se il TES (Thermal Energy Storage) fosse realizzato con un calcestruzzo contenente un PCM di tipo inorganico.

Le principali problematiche dell'impiego dei materiali a cambiamento di fase all'interno della pasta cementizia sono:

- la determinazione della velocità di riscaldamento in funzione della percentuale di PCM presente nell'impasto;
- l'indebolimento meccanico del calcestruzzo a causa della riduzione del rapporto aggregato cemento;
- l'elevata espansione termica che queste tipologie di materiali hanno, non compatibili con le deformazioni della matrice cementizia.

In questo lavoro sono state eseguite alcune stime su queste principali tematiche, andando a sviluppare un codice ad elementi finiti termo-igrometrico in grado di valutare il comportamento di un calcestruzzo soggetto ai cicli termici di progetto, considerando percentuali variabili di PCM, uniformemente distribuito nella matrice cementizia.

Il PCM deve risultare in una fase solida a temperatura ambiente, per garantirne la lavorabilità durante l'impasto, mentre durante la fase di riscaldamento esso deve cambiare stato solido-liquido per consentire l'incremento di accumulo termico.

Attualmente è ancora in fase di studio la modalità di inserimento di questo materiale nella miscela di calcestruzzo, si dovranno garantire alcune caratteristiche fondamentali quali:

- distribuzione omogenea del PCM sul volume di calcestruzzo (Figura 178) per garantire un comportamento isotropo del materiale, sia in termini meccanici che termici;
- il PCM dovrà essere non spingente sulla matrice durante il cambio fase, per non creare fessurazioni nella pasta di cemento che comporterebbero una riduzione della capacità di accumulo del sistema.
- non dovranno inoltre esserci riduzioni rilevanti nelle prestazioni meccaniche del materiale rispetto ad un calcestruzzo equivalente senza inclusioni.

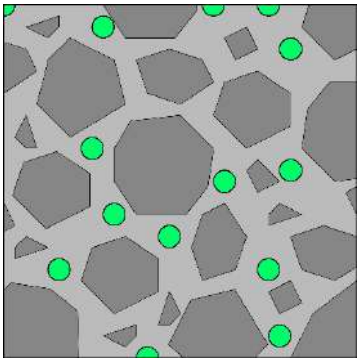


Figura 178. Calcestruzzo con l'inclusione di celle in PCM

Una possibile soluzione a queste problematiche è quella di introdurre nell'impasto delle celle di PCM, realizzate con sottili sfere in acciaio parzialmente riempite con questo materiale.

Inizialmente le celle risultano come in Figura 179a e vengono mescolate nell'impasto rimanendo completamente inerti durante le fasi di idratazione del calcestruzzo. Quando l'elemento di accumulo risulta soggetto ad elevate temperature il PCM passa allo stato liquido aumentando di volume ed andando così ad occupare il vuoto della cella (Figura 179b). Questa espansione volumetrica risulta così localizzata all'interno della cella senza causare una spinta idrostatica nella pasta cementizia presente attorno alla cella stessa.

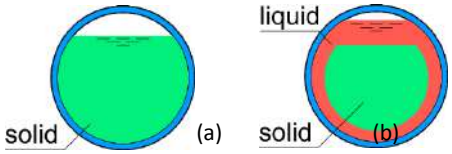


Figura 179. a) Cella fredda; b) Cella calda con cambiamento di fase

La presenza di PCM all'interno di una miscela di calcestruzzo può comportare due principali modifiche alla resistenza del materiale finale: la prima dovuta all'espansione del PCM durante il cambiamento di fase; mentre la seconda è la riduzione della percentuale di aggregati, a causa dell'aggiunta nel mix design delle celle contenenti il materiale a cambiamento di fase, che comporta una minor compattazione del calcestruzzo.

Considerando PCM inorganici, quali i sali già impiegati come fluido termovettore in esperienze ENEA pregresse, la variazione volumetrica durante il passaggio di stato (solido liquido) è dell'ordine del 4,6% non compatibile con quelle di un calcestruzzo commerciale. Per questo motivo è stato previsto che l'inclusione del PCM avvenga mediante apposite capsule per garantire una compatibilità meccanica tra i due materiali durante il riscaldamento, come spiegato precedentemente.

Le capsule dovranno essere sufficientemente rigide per mantenere la tenuta durante la miscelazione del calcestruzzo, in modo da non schiacciarsi durante la fase di presa della matrice, ma non avranno caratteristiche strutturali. Il volume delle capsule dovrà quindi essere considerato come una frazione mancante di inerte nell'impasto, considerato come una cavità, andando così a ridurre la resistenza meccanica del materiale omogeneizzato. Le capsule dovranno inoltre risultare sufficientemente piccole, da non ridurre eccessivamente la sezione utile dell'elemento realizzato e garantire una distribuzione omogenea durante l'impasto, in modo da non ottenere delle zone con accumuli di PCM che andrebbero ad indebolire notevolmente la struttura. Questo può essere ottenuto mantenendo la dimensione massima delle capsule pari a quella dell'inerte grossolano impiegato nell'impasto.

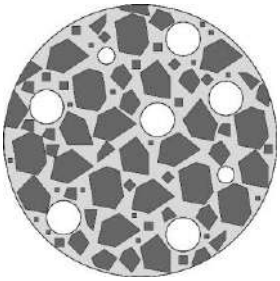


Figura 180. Schema di una sezione trasversale di un provino in calcestruzzo con inclusioni di PCM

Sono state fatte considerazioni analitiche e numeriche, mediante analisi FEM (Finite Element Modeling) tridimensionali termo-igro-meccaniche, per la determinazione della riduzione delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo a causa dell'inclusione di PCM (meccanicamente assunto come un vuoto all'interno della matrice cementizia).

Modelli tridimensionali in mesoscala sono stati sviluppati, andando a rappresentare esplicitamente il calcestruzzo come materiale eterogeneo composto da pasta cementizia, aggregati grossi, PCM ed ITZ (interfacial transition zone, un sottile strato di calcestruzzo che si forma durante il processo di idratazione del calcestruzzo fresco attorno alle inclusioni, molto poroso con resistenza inferiore rispetto alla matrice cementizia). In Figura 181 una cella rappresentativa in mesoscala del TES.

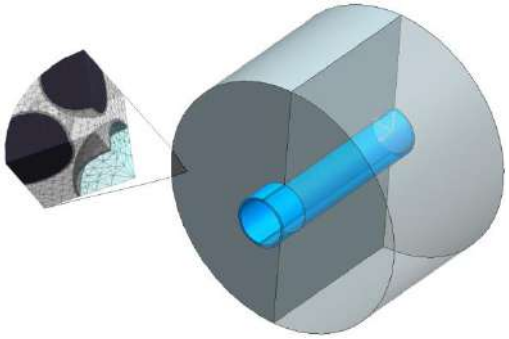


Figura 181. Cella rappresentativa in mesoscala del TES contenente aggregati grossolani, ITZ ed inclusioni di PCM (in azzurro, trasparenti poiché assunti meccanicamente come dei vuoti)

Le caratteristiche igro-termo-meccaniche delle varie componenti sono state opportunamente assunte, basandosi su dati in letteratura e precedenti lavori per la caratterizzazione del calcestruzzo, e su rapporti interni ENEA per il materiale a cambiamento di fase. Come detto in precedenza, dal punto di vista meccanico, il PCM viene assunto come un vuoto mentre pasta cementizia, ITZ e aggregati presentano un comportamento visco-elasto-danneggiato. Nello specifico il fenomeno di creep obbedisce al modello B3 proposto da Bažant e Baweja, invece il danno alla legge di Mazars con la correzione non locale.

Questa rappresentazione del calcestruzzo è in grado di determinare gli effetti di iperstaticità interna dovuta alle diverse caratteristiche meccaniche dei vari componenti, innescando concentrazioni di deformazioni e tensioni durante il processo di riscaldamento del materiale, che possono portare ad un danno meccanico dovuto alla termica non visibile mediante l'utilizzo di modello in macroscala. Il danno meccanico a 300°C per le due celle è riportato in Figura 182; dalla mappa ottenuta si può notare come la presenza di una sfera di materiale a cambiamento di fase comporti un piccolo incremento di danno, rispetto ad una cella che ne è priva.

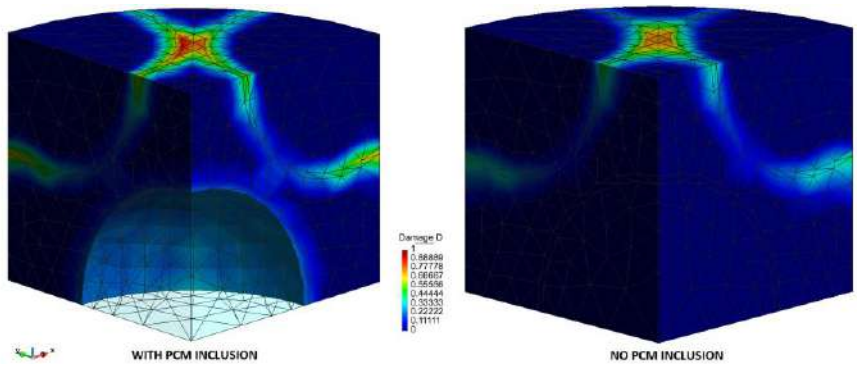


Figura 182. Danno a 300 °C per una cella base contenente o meno l'inclusione di PCM

Da queste valutazioni preliminari si è potuto vedere come la presenza di inclusioni comporti una riduzione di resistenza meccanica crescente al variare della percentuale di PCM, fino ad un massimo di circa il 14%, considerando un 10% di materiale a cambiamento di fase. Lo stesso materiale soggetto alla sola azione termica presenta un'ulteriore variazione di resistenza dovuta agli effetti iperstatici dati dall'eterogeneità del materiale. Considerando che i sistemi TES generalmente non hanno funzioni strutturali, se non quelli atti a sostenere il proprio peso, riduzioni di resistenza di questa entità dovrebbero garantirne comunque la funzionalità. Eventuali macro fessurazioni che potrebbero ridurre l'efficacia di accumulo del sistema non sono state valutate.

La variazione della capacità termica del materiale composito è stata esaminata grazie allo sviluppo di un codice ad elementi finiti HT, in grado di risolvere le problematiche non lineari che questa tipologia di materiali presenta, durante il processo di riscaldamento. Il codice considera una matrice costitutiva omogeneizzata, ipotizzando una distribuzione uniforme delle inclusioni all'interno della matrice cementizia, mediandone tutte le caratteristiche igrotermiche.

Concludendo, la presente attività di ricerca ha dimostrato la possibilità di poter impiegare PCM inorganici per incrementare l'accumulo termico nei sistemi TES, oppure di ridurre il volume dell'accumulo solido a parità di capacità termica (impiegando un calcestruzzo ordinario).

Questa attività di ricerca dovrebbe quindi proseguire affrontando i seguenti temi:

- una migliore caratterizzazione delle capsule andando a valutarne la fattibilità realizzativa;
- valutare gli effetti di questi materiali compositi per temperature di esercizio superiori ai 300°C;
- indagare il comportamento termico del TES se fessurato;
- investigare la riduzione di prestazione a causa degli effetti di fatica prodotti durante i cicli termici dell'impianto;
- problematiche di contatto tra TES e il tubo ricevitore, immerso nella matrice.

b.4 Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo

Le attività svolte da ENEA hanno riguardato la caratterizzazione sperimentale del comportamento di sistemi elementari di accumulo termico sia a calore sensibile (calcestruzzi speciali) che a calore latente (materiale a cambiamento di fase-PCM) durante le fasi di carico e scarico del sistema. In entrambi i casi il lavoro eseguito ha riguardato: la realizzazione dei sistemi elementari di accumulo, la realizzazione di un circuito di prova per l'analisi dei sistemi di accumulo, la pianificazione delle prove da eseguire, l'esecuzione delle prove e l'elaborazione, l'analisi e la valutazione dei risultati sperimentali.

L'attività è stata condotta in collaborazione con le Università di Padova e Trento. Il contributo dell'Università di Padova ha riguardato in particolare l'impostazione della campagna sperimentale e l'analisi e l'interpretazione dei risultati, mentre l'Università di Trento si è occupata della caratterizzazione microstrutturale di un elemento di accumulo termico, precedentemente realizzato in calcestruzzo e sottoposto a ciclaggio termico presso i laboratori dell'ENEA, e della preparazione e caratterizzazione di un calcestruzzo innovativo, ottimizzato per la preparazione di moduli di accumulo termico su larga scala.

Accumulo a calore sensibile in cementi

L'accumulo di energia sotto forma di calore sensibile in materiali cementizi, è tuttora oggetto di ricerca specialmente presso i laboratori tedeschi del DLR. Tale soluzione sembra essere in grado di ridurre in modo considerevole i costi del sistema di accumulo riducendo il costo dell'energia termica accumulata (€/kWh). Va però presa in esame una criticità d'integrazione di questa tipologia di accumulo in un impianto solare a concentrazione. Occorre inoltre tenere in conto anche le problematiche connesse al comportamento del calcestruzzo durante la fase di preriscaldamento; la presenza di una quantità di acqua libera evaporabile all'interno del calcestruzzo, può produrre un danneggiamento a seguito di un aumento della pressione del vapore. Altro elemento da considerare è le capacità di resistere nel tempo, ai cicli giornalieri di carico e scarico del calore ai cui fanno seguito rilevanti sollecitazioni termomeccaniche. Negli anni passati sia ENEA che l'Università di Padova hanno lavorato sul comportamento termo-igro-meccanico dei calcestruzzi sottoposti ad elevate temperature (vessel e contenitori in calcestruzzo in ambito nucleare, tunnel ed edifici sotto carico da incendio), maturando competenze e sviluppando software d'analisi specifici. A giugno 2013 si è concluso il progetto SOLTECA finanziato dalla Fondazione CAssa di RIsparmio di Trento e ROvereto (CARITRO), che a visto il coinvolgimento dell'Università di Trento in aggiunta all'Università di Padova e all'ENEA.

Nel progetto sono state affrontate le problematiche relative alla produzione di un mix di calcestruzzo da impiegare negli elementi di accumulo, aspetti teorici connessi al dimensionamento termico e meccanico con sviluppo di metodi semplificati, la realizzazione e l'utilizzo di un circuito sperimentale per testare il comportamento degli elementi d'accumulo sviluppati.

Nella presente attività sono testati nuovi elementi d'accumulo, confezionati con una mescola a caratteristiche termo-fisiche migliorate, sviluppata presso l'Università di Trento. La revisione del circuito, delle sezioni di prova e delle modalità di test è sfrutto di una attività congiunta tra Università di Padova ed ENEA, ma condotta con compiti ben distinti e complementari.

Il circuito di prova Figura 183, è costituito da:

- un circolatore-riscaldatore Julabo SE-6, impiegante olio siliconico Alusil TR50 della Aluchem,
- flussimetro Rota della Yokogawa,
- un sistema di raffreddamento ad aria a tubo filettato per la rimozione del calore sottratto nella fase di scarico,
- un sistema di piping in grado di alimentare gli elementi di accumulo disposti in serie in circolazione oraria o antioraria, mediante l'azionamento manuale di 4 valvole.

Le modalità operative del circuito sono:

- circolazione oraria in fase di carico con V1 e V2 aperte e V4 e V3 chiuse
- circolazione antioraria in fase di scarico con V3 e V4 aperte e V1 e V2 chiuse
- circolazione di raffreddamento olio V1 e V4 chiuse, V2 e V3 (non si ha circolazione negli elementi di accumulo).

La valvola VM di regolazione viene mantenuta sempre aperta per lavorare alla massima portata possibile.

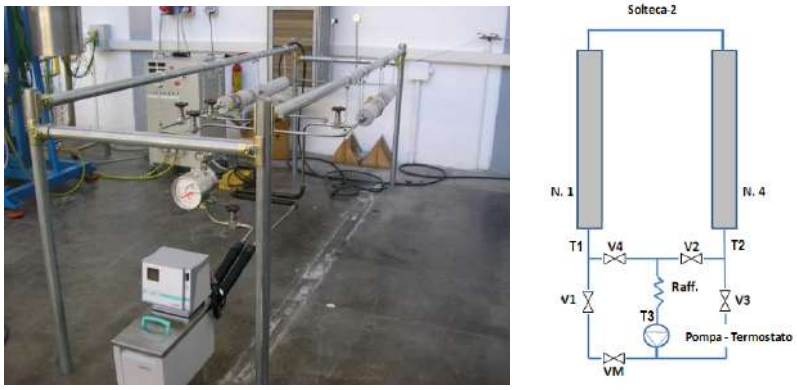


Figura 183. Circuito ad olio siliconico SOLTECA, per il test degli accumulatori termici elementari, in fase di assemblaggio ed in esercizio

Prima dell'inizio della campagna sperimentale è necessario un "condizionamento" dei moduli di accumulo per favorire la migrazione dell'acqua libera presente nei materiale (calcestruzzo), fenomeno noto come degasaggio, per evitare sovrappressioni locali dovute alla repentina vaporizzazione dell'acqua libera a causa delle elevate temperature di esercizio. Ovviamente il ciclo è stato effettuato a provini nudi, ossia privi di coibente, evitando l'impregnazione del coibente con alterazione delle sue capacità isolanti. Ulteriore obiettivo è stata l'analisi visiva dei provini di calcestruzzo, al fine di rilevare la presenza di nuove cricche o l'incremento di quelle già esistenti al momento del primo riscaldamento.

L'operazione di degasaggio viene effettuata modulando opportunamente la temperatura dell'olio in modo da favorire la fuoriuscita di vapore contenendo i gradienti termici per evitare stress meccanici sul materiale. La procedura è stata sviluppata dall'Università di Padova e prevede un funzionamento a 80 °C per almeno 10 ore, con il successivo raggiungimento dei 160 °C in 3 ore con rampa lineare. La temperatura è stata poi mantenuta costante per 34 ore. A seguire si è arrestata la circolazione dell'olio e il circuito si è raffreddato naturalmente fino a temperatura ambiente (Figura 184 e 185).

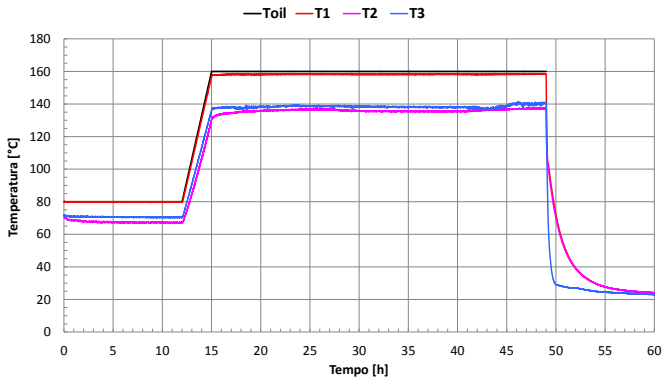


Figura 184. Evoluzione temporale delle temperature dell'olio

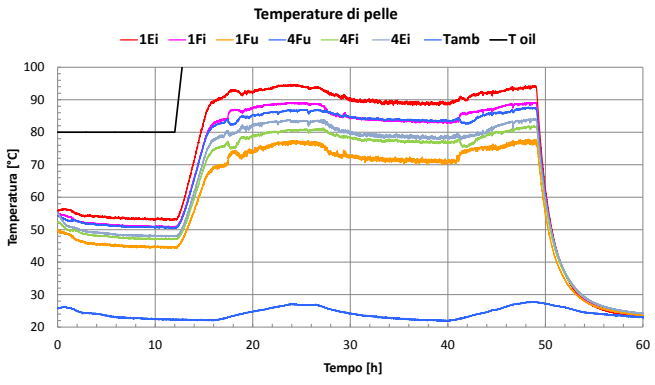


Figura 185. Evoluzione temporale delle temperature di pelle degli elementi di calcestruzzo

L’esame visivo degli elementi di accumulo a caldo durante la prova, ha evidenziato alcune fessurazioni (Figura 186) che sono state riassorbite completamente a provino freddo. La drastica riduzione del quadro fessurativo rispetto a quanto rilevato nella precedente campagna sperimentale è indice del miglioramento delle caratteristiche della nuova mescola.



Figura 186. Quadro fessurativo elemento 1 a caldo durante test di degasaggio

Per analizzare le prestazioni, gli elementi di accumulo devono essere sottoposti a cicli ripetuti di carico e scarico. In questa prima fase è stato analizzato un funzionamento continuativo per due giorni con quattro cicli completi di carico e scarico.

Il caricamento degli elementi viene effettuato partendo da una distribuzione stazionaria delle temperature del calcestruzzo con il fluido in ingresso a circa 180 °C e incrementando la temperatura dell’olio a 240 °C con una rampa lineare in circa 26 min. Da questo momento la temperatura dell’olio rimane costante per 2 ore.

Per effettuare la fase di scarico è necessario interrompere la circolazione dell’olio nei moduli, raffreddare l’olio presente nel Julabo, a 180°C e riattivare la portata invertendo il senso di circolazione (circolazione antioraria). Questa fase dura per 2 ore, successivamente viene ripetuto il ciclo. La figura 181 mostra l’inviluppo dei primi quattro cicli effettuati in cui è stato rappresentato il mantenimento a 180°C durante il funzionamento notturno.

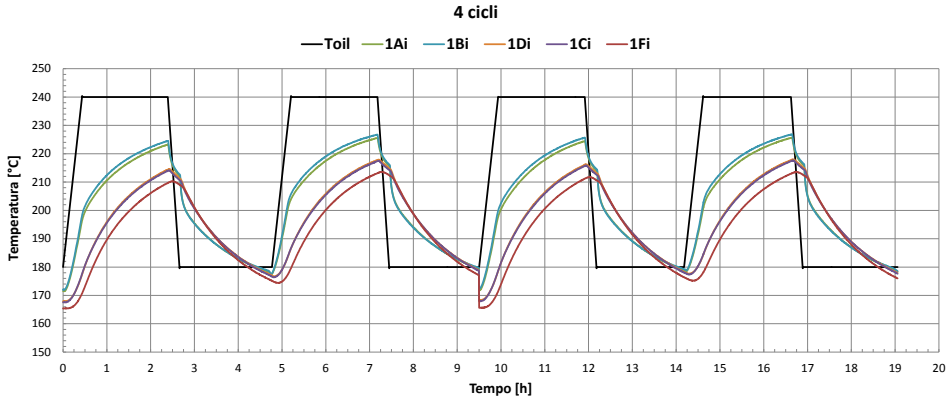


Figura 187. Inviluppo dei quattro cicli carico e scarico 240-180 °C, per la sezione 1i.

Il comportamento termico rilevato dai profili di temperatura acquisiti e le indagini del quadro fessurativo rilevabile in superficie dopo il degasaggio, comparati con quanto ottenuto nella precedente campagna sperimentale (Solteca-1), mostrano l’efficacia della nuova mescola prodotta dall’Università di Trento. I test di ciclaggio dovranno però essere prolungati al fine di avere una maggior certezza nel comportamento di lungo periodo. Le tecniche di posizionamento delle termocoppie sono risultate più affidabili, così che i profili rilevati sono più correttamente interpretabili e confrontabili con i risultati provenienti da corrispondenti analisi condotte con strumenti numerici. La lavorabilità del calcestruzzo va migliorata, soprattutto nell’ottica di realizzare getti più massivi e complessi. Occorre considerare in parallelo ai test condotti con fluidi HTF, test con tecniche alternative di riscaldamento e refrigerazione (riscaldamento ad induzione e refrigerazione con aria compressa), al solo fine di consentire un invecchiamento accelerato degli elementi di accumulo. Occorre inoltre passare da test condotti su un singolo canale di accumulo, ad un modulo con capacità di accumulo più estese ed approfondire le modalità di integrazione di tali sistemi di accumulo all’interno di un impianto solare di piccola e media taglia.

Accumulo a calore latente

La presente sezione è dedicata alla descrizione di tutte le fasi necessarie alla caratterizzazione sperimentale degli elementi di accumulo a calore latente in studio all'interno del presente progetto.

Realizzazione dei sistemi elementari di accumulo

Sulla base del progetto dei sistemi elementari di accumulo termico è stata commissionata la loro realizzazione alla ditta Nuova Steim di Narni (Figura 188). Il numero complessivo di elementi di accumulo, di tipo "guscio e tubo", è di 12 unità: 6 con tubo liscio e 6 con tubo alettati. Tutti gli elementi sono opportunamente coibentati in modo da limitare al massimo le perdite di calore verso l'ambiente. Due elementi per ciascuna tipologia presentano 9 ingressi per il posizionamento di altrettante termocoppie, suddivise su 3 piani (uno medio e due estremali) e 3 punti di misura (uno in prossimità del tubo, uno del guscio e uno intermedio).



Figura 188. Tubo alettato, accumulatori elementari e accumulatori con coibentazione e lamierino esterno

Realizzazione della sezione di prova per l'analisi dei sistemi di accumulo

Sulla base del progetto della sezione di prova, sono stati acquistati, presso diversi fornitori, i componenti base necessari alla sua realizzazione (tubazioni, valvole, connettori, gruppo di riscaldamento e raffreddamento, flussimetro, strutture di sostegno, coibente, etc). In una prima fase si è proceduto al riempimento degli accumulatori elementari con il mezzo di accumulo a cambiamento di fase selezionato. Gli accumulatori elementari sono stati sottoposti a misura del peso sia prima che dopo il riempimento per determinare la quantità esatta di PCM da introdurre: questa è risultata pari a circa 3 kg, come previsto dal progetto degli stessi. Successivamente, si è proceduto al montaggio della sezione di prova (Figura 189).



Figura 189. Fasi di assemblaggio della sezione di prova

Pianificazione delle prove da eseguire

Le prove da eseguire sono state pianificate secondo lo schema seguente:

- Test n. 1: Caricamento iniziale (20°C- 200°C)
- Test n. 2: Fase di carico (200°C - 260°C)
- Test n. 3: Fase di scarico (260°C - 200°C)
- Test n. 4: Ciclo carico-scarico giornaliero.

I test vanno ripetuti su entrambe le linee di accumulo, quella con tubi lisci e quella con tubi alettati.

Esecuzione delle prove e analisi dei risultati

Le prove sperimentali eseguite sono tese, in prima istanza, alla verifica funzionale dell'impianto realizzato e a una prima interpretazione del comportamento termico del sistema di accumulo e delle sue dinamiche. A tal fine, è stato programmato un unico test (Figura 190) che, in sequenza esegue sia il riscaldamento iniziale (Test n. 1) che la fase di carica del sistema di accumulo (Test n. 2). L'impianto è stato predisposto per la circolazione relativa alla linea A (Accumulatori a tubi lisci). Il test è stato effettuato sostituendo le previste fasi di riscaldamento in ricircolo con un riscaldamento con circolazione attiva sul sistema di accumulo. Ciò per evitare, in questa prima esperienza, un possibile shock termico dei componenti.

Per il test di caricamento iniziale (20 - 200°C) è prevista una durata complessiva di 9 ore mentre quello relativo alla fase di carico (200 - 260°C) di 11 ore.

La prova effettuata ha avuto una durata effettiva di circa 18,5 ore come mostrato in Figura 191, dove sono mostrate le temperatura di mandata (C2) e di ritorno (C1) dell'olio e la potenza termica calcolata fornita dal termo-criostato. Naturalmente, il calcolo della potenza riportata è funzione della portata in massa del sistema. Questo dato purtroppo non è al momento disponibile in quanto il flussimetro installato, per motivi tecnici, non ha potuto fornire detta misura.

Per poter comunque fare delle valutazioni, si è tenuto conto che il termo-criostato dovrebbe fornire una portata volumetrica sostanzialmente costante, negli intervalli di temperatura considerati, e pari a circa 10 L/min.

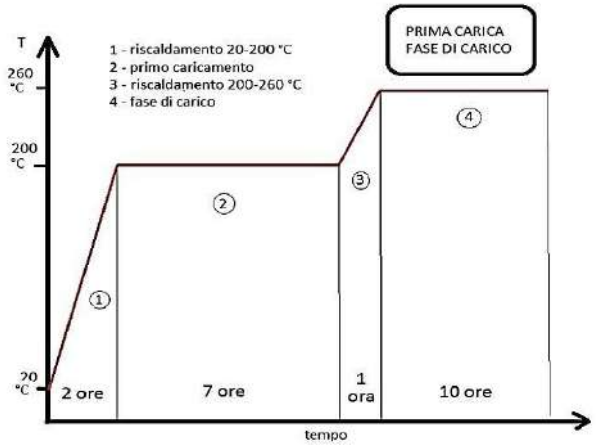


Figura 190. Programmazione della fase di prova da impostare sul termo-criostato

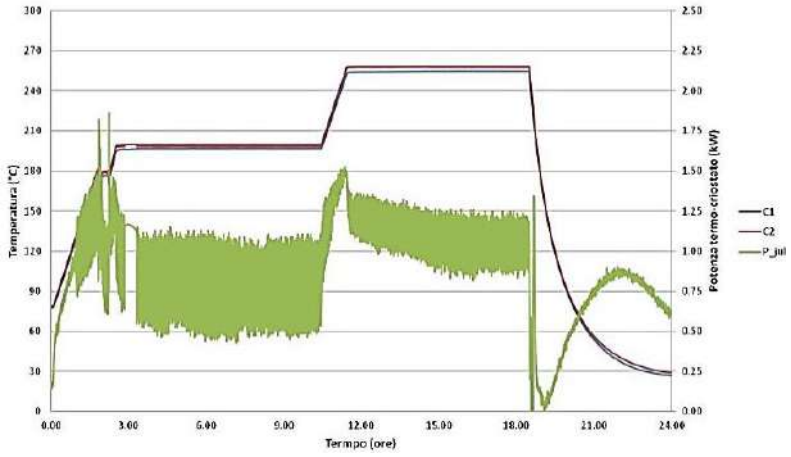


Figura 191. Andamento delle temperature di mandata e ritorno dal tremo-criostato e potenza fornita dallo stesso

Con le caratteristiche della nostra sezione di prova ciò dovrebbe corrispondere ad una velocità dell'olio di circa 1,08 m/s. La portata in massa sarà allora calcolata conoscendo la densità dell'olio diatermico in funzione della temperatura dello stesso. Questa, in genere, varia tra 0,14 e 0,16 kg/s.

A partire da questo dato è allora possibile valutare i parametri principali che governano il flusso del fluido termovettore (numero di Reynolds - Re) e lo scambio termico tra olio e accumulatore (coefficiente di scambio - h). Tali valori mostrano che, ad eccezione dei primi istanti di riscaldamento, il flusso dell'olio ha un valore di Reynolds superiore a 18000 e quindi il flusso è completamente turbolento. Di conseguenza, anche lo scambio termico è buono, con un coefficiente compreso tra 850 e 100 W/(m^2 °C).

Le perdite riscontrate per il sistema di accumulo sono modeste e si attestano su valori inferiori ai 70 W per elemento (circa 0,2 kW totali). I salti termici, che si evidenziano tra le temperature di ingresso ed uscita dai tre accumulatori, sono minimi (inferiori al grado) e quindi difficilmente visualizzabili (Figura 192). E', invece, più visibile la riduzione delle temperature nel passaggio tra un accumulatore e l'altro.

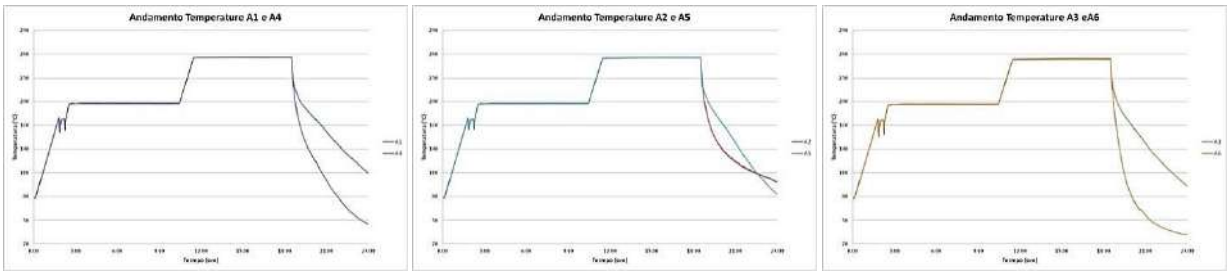


Figura 192. Andamento delle temperature di ingresso ed uscita dai tre accumulatori (rispettivamente A1 e A4 per il primo, A5 e A2 per il secondo e A3 ed A6 per il terzo)

Studio di calcestruzzi per l'accumulo di calore sensibile per media temperatura, con produzione di elementi strumentati per campagna sperimentale

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Trento ha riguardato in particolare lo studio e sviluppo di nuove mescole di calcestruzzo per utilizzo come sistema di accumulo a media temperatura (250-300°C), e la produzione di moduli base di accumulo per la sperimentazione nel circuito di prova messo a punto presso i laboratori dell'ENEA.

Lo scopo principale di questo lavoro è stato la preparazione e la caratterizzazione di un calcestruzzo innovativo con migliorate proprietà termiche, a base di materiali riciclati a basso costo, ottimizzato per la preparazione di moduli di accumulo termico su media e larga scala. La scelta del calcestruzzo come materiale per TES nasce da una somma di considerazioni: è un materiale a basso costo, facilmente reperibile, facile da produrre, durevole, i suoi componenti principali sono disponibili ovunque e non pongono problemi critici dal punto di vista ambientale. Inoltre grazie alle sue proprietà termiche e meccaniche (resistenza a compressione e coefficiente di espansione termica simile a quello dei tubi d'acciaio dello scambiatore), il calcestruzzo già nella formulazione ordinaria (miscela A) garantisce un'elevata risposta alle sollecitazioni indotte da cicli di riscaldamento/ raffreddamento.

A tal proposito, è stato valutato con un'accurata analisi microstrutturale, lo stato ed il danneggiamento di un modulo di accumulo, precedentemente prodotto nel laboratori dell'Università di Trento con un calcestruzzo di riferimento e testato attraverso ciclaggio termico presso i laboratori ENEA. Sulla base dei risultati ottenuti, si è quindi deciso di procedere con la preparazione di un nuovo modulo di accumulo, utilizzando una nuova miscela di calcestruzzo.

L'innovazione principale introdotta nella preparazione del calcestruzzo e oggetto di tale studio è stata di utilizzare cariche metalliche, consistenti in trucioli metallici scarti di officina meccanica. Scelta interessante per il basso costo delle materie prime, unitamente al miglioramento della conducibilità termica e del calore specifico del calcestruzzo che ne è conseguito.

Si sono registrati oltre agli attesi incrementi di conducibilità termica (fino a valori di 2,74 W/m K) e capacità termica (0,80 J /g K), anche il miglioramento delle proprietà meccaniche ed in particolare del modulo elastico.

Nello studio, la valutazione degli aspetti economici per un'eventuale industrializzazione del processo produttivo è stata tenuta in gran considerazione ed il calcestruzzo progettato è di sicuro interesse dal punto di vista commerciale. Oltre alla progettazione e scelta dei materiali della miscela innovativa (miscela B), ha avuto una

parte a sé stante nello studio la progettazione e la realizzazione del prototipo di elemento d'accumulo. Esso una volta prodotto con la miscela innovativa è stato sottoposto a ciclaggio termico presso i laboratori dell'ENEA. Il risultato finale è che esso non ha mostrato fenomeni di spalling o fessurazioni. Il coefficiente di dilatazione termica lineare misurato per tale miscela si è confermato essere simile a quello di un acciaio inossidabile usato per la costruzione dello scambiatore di calore.

Nella fase di progettazione della miscela ci si è prefissi di bilanciare ed incrementare opportunamente le due quantità fisiche che controllano la dinamica del trasporto di calore: conducibilità e calore specifico. Il conseguimento di tale obiettivo non sarebbe dovuto andare a detrimento delle caratteristiche meccaniche e della durabilità, per un tempo di vita in esercizio del componente, stimato in 30 anni. È stato necessario valutare anche i parametri che determinano la lavorabilità, la facilità della messa in opera abbinata al basso costo della materia prima impiegata, i coefficienti di dilatazione termica e di ritiro, al fine di limitare distacchi tra tubo e calcestruzzo che inficerebbero i fenomeni di trasporto e di accumulo di calore. Nella progettazione delle miscele si sono tenuti in considerazione gli standard delle norme Europee EN.197-1 e EN 206-1. Per la produzione dei provini di varia forma (cilindrica, cubica e a travetto), da impiegare nelle caratterizzazioni meccaniche, si è applicato quanto prescritto nelle norme UNI 11307:2008 (ritiro igrometrico), UNI EN 12390-3:2003 (resistenza a compressione), UNI 6556:1976 (modulo elastico). Dopo 28 giorni di stagionatura sono state eseguite le seguenti caratterizzazioni: misure di capacità termica mediante calorimetria differenziale a scansione, di coefficiente di dilatazione termica tramite test dilatometrico ed infine conducibilità termica. Sono state inoltre eseguite indagini volte a valutare la stabilità del calcestruzzo in temperatura con misure termo-gravimetriche. La morfologia dei campioni prima del ciclaggio termico per il modulo di mescola nuova e dopo il ciclaggio per quello precedente è stata indagata tramite microscopia elettronica a scansione.

La miscela, che è stata selezionata sulla base del processo di mix-design, è servita per realizzare degli elementi di accumulo completi di tubazione e termocoppie, sottoposti in seguito presso i laboratori dell'ENEA a campagna sperimentale di monitoraggio durante ciclaggio termico. Il lavoro è stato diviso in tre fasi:

- ottimizzazione delle caratteristiche termiche e meccaniche del calcestruzzo da impiegare negli elementi di accumulo termico;
- produzione di provini ed elementi di accumulo da impiegare nella campagna sperimentale;
- rilievo del grado di danneggiamento di provini ed elementi di accumulo trattati termicamente.

In Tabella 71 è riportato il mix design relativo alla mescola A di riferimento. Questa è il risultato di una precedente ricerca condotta dall'Università di Trento che ha portato, con la collaborazione di ENEA, alla produzione di prototipi strumentati.

Tabella 71. Mix design della mescola A di riferimento[13] e della nuova mescola B

Mescola A	
Acqua (kg/m^3)	97
Cemento (kg/m^3)	280
Ghiaia (12-25) (kg/m^3)	400
Ghiaino (8-12) (kg/m^3)	200
Sabbia (0-4) (kg/m^3)	995
Fibre Nylon (kg/m^3)	5
Rapporto a/c	0,35

Mescola B	
Acqua (kg/m^3)	120
Cemento (kg/m^3)	340
Ghiaino (7-15) (kg/m^3)	780
Sabbia (0-7) (kg/m^3)	780
Sabbia (0-4) (kg/m^3)	390
Fibre Nylon (kg/m^3)	5
Trucioli metallici (kg/m^3)	77
Rapporto a/c	0,35

* Gli aggregati sono stati utilizzati in condizione satura superficie asciutta (SSD).

La caratteristica principale di questa miscela è il basso rapporto a/c=0,35, e, anche a causa dell'assenza di super fluidificanti, la scarsa lavorabilità: l'abbassamento del cono di Abrams è nullo. La scarsa lavorabilità di per sé non è un parametro negativo, ma fondamentale quando si vuole industrializzare e automatizzare il processo di produzione di manufatti in calcestruzzo, perché è compatibile con alcune tecnologie produttive già in uso per la produzione di tubazioni. L'uso di materiali di riciclo è generalmente incoraggiato per l'abbassamento dei costi.

Le fibre utilizzate da sole nella mescola A sono di poliammide (Nylon 66), provenienti dallo smaltimento dei rifiuti dell'industria delle moquette. Sempre per il contenimento dei costi, la scelta del cemento è caduta sul Portland al

[13] O.B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, CE. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio, "Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems", Mater Des, v, 51 (2013), pp, 989-997

calcare di tipo II (CEM II/A-LL 42.5), che è tra i cementi più diffusi ed economici in commercio. E' stato utilizzato aggregato di tipo dolomitico in tre frazioni e la massa volumica ha raggiunto un valore soddisfacente.

La resistenza su cilindro ed il modulo elastico misurati su campioni cilindrici dopo 28 giorni di stagionatura umida risultano essere 39 $\pm$ 2 MPa e 36 $\pm$ 2 GPa, rispettivamente. La mescola A possiede una conducibilità termica a 25 °C di 1,30 ± 0,02 W/m K ed 1,16 ± 0,02 W/m K dopo un trattamento termico a 300 °C per 4 ore. Il calore specifico è compreso tra 0,6 e 0,7 J/g K dopo un ciclaggio termico fino a 350 °C. Inoltre, la misura del coefficiente di dilatazione termica lineare (CTE) mostra un valore di $\alpha_{calcestruzzo}$ =17,2 10^{-6} K^{-1} che è molto simile a quello dell'acciaio inossidabile, $\alpha_{acciaio}$ =17,5 10^{-6} K^{-1}, usato commercialmente per le tubazioni.

In Tabella 70 è riportato il mix design relativo alla nuova mescola B. L'aggregato è stato scelto di dimensione 15 mm sulla base dell'esperienza precedente e delle dimensioni scelte per il prototipo. Tenendo conto anche di un'eventuale industrializzazione, il cemento usato è del tipo II rapido al calcare (CEM II/A-LL 42.5 R). Le fibre di nylon sono dello stesso tipo di quelle utilizzate nel precedente caso. Grazie alle fibre di nylon il calcestruzzo mostra un limitato ritiro igrometrico: questo è sempre utile perché coincide con una più limitata formazione di micro-fessure nella pasta di cemento e rende il materiale più durevole. Le analisi al microscopio elettronico hanno mostrato una buona compatibilità delle fibre di nylon e i trucioli metallici con il calcestruzzo e non mostrano rilevanti segni di degrado dopo un trattamento termico a 250 °C. Inoltre le modifiche introdotte nella miscela B sono compatibili con l'industrializzazione del processo produttivo per vibro-compattazione, del tutto simile a quello ora utilizzato nella produzione di tubazioni in CLS.

Per quanto riguarda i trucioli metallici, essi sono scarti di lavorazione di materiale ferroviario, acciaio con un leggero quantitativo di manganese. La lunghezza dei trucioli metallici varia tra 10 e 30 mm, mentre la sezione è compresa tra 0,1 e 0,2 mm^2. L'utilizzo di trucioli di acciaio di riciclo ha portato molteplici benefici. Le proprietà meccaniche, come la resistenza a compressione e il modulo elastico, non hanno subito una sostanziale modifica, 34±2 MPa e 38,3 GPa, rispettivamente. Come carica metallica, sono state considerate anche le polveri metalliche ottenute per atomizzazione per la formatura di pezzi tramite sinterizzazione. Nonostante le elevate potenzialità di queste polveri e del calcestruzzo risultante, il loro uso è stato scartato a causa dei costi troppo elevati che avrebbe raggiunto il calcestruzzo. Le proprietà termiche della mescola B, grazie proprio ai trucioli immersi nella matrice cementizia, si sono modificate nella direzione richiesta da questa collaborazione. La conducibilità termica ha mostrato l'atteso forte incremento, arrivando a valori di 2,74 W/m K a temperatura ambiente e di 2,13 W/m K dopo aver subito un trattamento termico a 300 °C per 4 ore. Inoltre la conducibilità termica si mantiene a valori elevati anche in seguito a trattamenti isotermi a 150, 250, 350 e 450 °C, eseguiti per confermare la stabilità termica e l'assenza di fenomeni di spalling. Il calore specifico è passato dagli 0,5-0,6 J/gK della miscela A di riferimento a valori di circa 0,80 J/gK per la nuova mescola B. Il coefficiente di dilatazione termica lineare è paragonabile a quello di un acciaio inossidabile usato per la costruzione dello scambiatore di calore. Da questi risultati si evince che è possibile utilizzare questo calcestruzzo per la preparazione di elementi di accumulo termico per applicazioni su larga scala. Sono stati preparati due moduli di accumulo strumentati del diametro di 10 cm e della lunghezza di 100 cm.

Infine è stato valutato il grado di danneggiamento di un modulo di accumulo, prodotto con la mescola di riferimento A e già testato ciclicamente presso ENEA a temperature di circa 240 °C. Le cricche osservabili in superficie si propagano anche verso l'interno, rimanendo sempre ortogonali all'asse principale dell'elemento e quindi non modificando i processi di trasporto dell'energia termica. Il calcestruzzo rimane adeso alla tubazione in acciaio, come già detto grazie ai simili coefficienti di dilatazione termica lineare dei due materiali. I valori di calore specifico misurati dopo il ciclaggio termico sono in linea con quelli misurati in DSC dopo due scansioni successive della stessa mescola A a 28 giorni di stagionatura.

Per approfondimenti sull'attività ENEA si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/230. Le attività svolte dalle Università di Padova e di Trento sono illustrate nei dettagli nei rapporti RdS/PAR2013/231 e RdS/PAR2013/232.

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 ed il suo generatore di vapore interno, sono state analizzate diverse soluzioni, è stata scelta quella migliore ed è stato realizzato il progetto preliminare.

L'attività è stata condotta, per quanto riguarda la parte sperimentale presso 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 in condizioni reali di esercizio del sistema, sia in stazionario che in transitorio

Nel contesto delle energie rinnovabili, caratterizzate 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 (TES), si propone di raccogliere l'energia solare al fine di poter traslare la sua consegna ad un secondo momento in cui serva, 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 la necessità di utilizzo di 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 193a), 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 193b). 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 a una notevole semplificazione dei circuiti termoidraulici (e conseguentemente della gestione dell'impianto) e di conseguenza ad una riduzione dei costi.

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 della suddetta miscela di sali fusi come mezzo di stoccaggio, 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 dei sali all'altro. Inoltre 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 (GV)integrato funge da elemento attivo che induce e mantiene nel tempo la stratificazione dei sali.

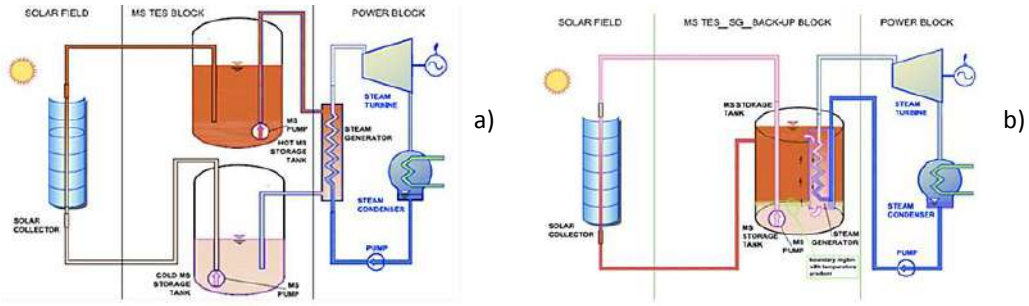


Figura 193. Due diverse possibili configurazioni di impianti solari CSP

A fronte di queste caratteristiche, è necessario testare sperimentalmente e provare la fattibilità e le capacità operative del sistema proposto. In tale ambito è stato sviluppato un programma sperimentale per la caratterizzazione del serbatoio di accumulo, utilizzando per lo scopo il già esistente serbatoio dell'Impianto sperimentale PCS dell'ENEA, sito nel Centro Ricerche Casaccia.

Nel corso del PAR 2012, è stata effettuata la caratterizzazione termica del serbatoio e del generatore di vapore e sono state eseguite prove sperimentali relative ai transitori di raffreddamento del serbatoio e lo studio della stratificazione del serbatoio in condizioni di riposo e operative in fase di scarica del contenuto energetico dei sali fusi.

Le nuove prove sperimentali sono state effettuate per completare l'analisi del comportamento della stratificazione dei sali fusi nel serbatoio di accumulo.

La campagna sperimentale ha riguardato l'effettuazione di ulteriori prove sperimentali per lo studio di:

1. raffreddamento dei sali fusi contenuti nel serbatoio con la verifica delle loro condizioni di stratificazione. Le prove consistono nel caricare di energia termica il serbatoio, portando alla temperatura di prova desiderata i sali fusi in esso contenuti, e poi innescare una stratificazione dei sali attraverso un breve funzionamento del generatore di vapore. A questo punto si lascia l'intero sistema abbandonato a se

stesso e quindi in condizioni di dispersione termica verso il solo ambiente esterno, per vedere se e come la stratificazione dei sali viene mantenuta nel tempo ovvero se essi si rimescolano per effetto di moti verticali naturali;

2. riscaldamento nelle condizioni reali di esercizio del serbatoio, cioè in condizioni stazionarie e con il contenuto energetico del serbatoio costante nel tempo. Questa situazione si è potuta ottenere utilizzando le modifiche apportate al serbatoio e all'impianto e cioè aspirando con la pompa di circolazione i sali freddi dal fondo del serbatoio, facendoli scaldare dall'apposita caldaia elettrica esterna e quindi reimmettendoli caldi nel serbatoio all'altezza del livello superiore dei sali. È il funzionamento che dovrebbe svolgersi negli impianti reali, dove il campo solare a specchi scalda i sali fusi e nell'impianto sperimentale è invece sostituito nella sua funzione dalla caldaia elettrica. In questo modo il sistema integrato viene provato nel suo insieme e si può studiare e verificare il comportamento accoppiato del serbatoio e del generatore di vapore e della stratificazione dei sali in condizioni reali di esercizio.

Prove di raffreddamento del serbatoio di accumulo

Le prove di scarica termica del serbatoio di accumulo sono state eseguite secondo la procedura operativa riportata in Tabella 72.

Tabella 72. Elenco delle prove sperimentali di scarica termica del serbatoio

Test n.	Temperatura sali [°C]	
	$T_{iniziale}$	T_{finale}
TD1	500	315
TD2	490	270
TD3	490	275
TD4	490	270

Nella prima prova (TD1, Figura 194) i sali sono portati a una temperatura uniforme e omogenea, e poi il serbatoio è lasciato per alcuni giorni senza alcun intervento per vedere il comportamento libero della massa di sali fusi in esso contenuti, e cioè se si stabilisce una stratificazione naturale di sali a causa della dispersione termica verso l'esterno.

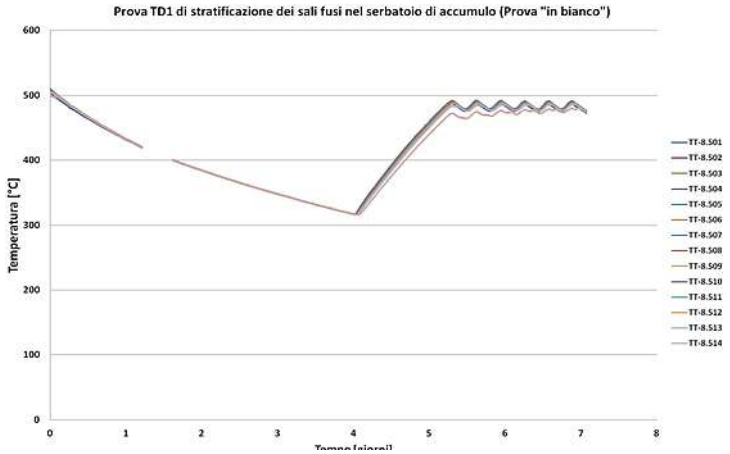


Figura 194. Andamento delle temperature di stratificazione nella Prova TD1

Dopo circa quattro giorni, la prova di dispersione è stata ritenuta conclusa ed è stato utilizzato il riscaldatore elettrico interno immerso per aumentare la temperatura della massa di sali fusi e riportarla al valore iniziale.

Le altre prove sono state eseguite a partire da una condizione di "riposo" del serbatoio; all'inizio di ogni prova, il generatore di vapore è stato fatto funzionare per un breve periodo di tempo per indurre una stratificazione della temperatura della massa dei sali fusi, e successivamente il serbatoio viene lasciato in riposo dal 1 a 4 giorni, osservando e registrando l'andamento delle temperature, in Figura 195 sono mostrati i risultati della prova TD2.

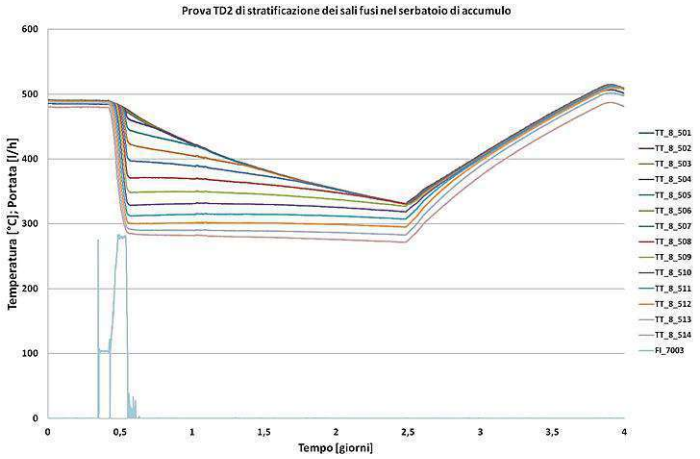


Figura 195. Andamento delle temperature di stratificazione e della portata di acqua del GV nella Prova TD2

Al termine della prova, tramite la resistenza elettrica immersa interna si aumenta nuovamente la temperatura del serbatoio.

I risultati delle prove confermano quanto ci si attendeva dalla situazione di stratificazione dei sali fusi contenuti nel serbatoio di accumulo: i sali fusi sono un fluido che, per le sue intrinseche proprietà chimico-fisiche (bassa conducibilità termica, elevata viscosità), tende a mantenere la stratificazione e a non rimescolarsi, permettendone così il proficuo utilizzo in un sistema integrato come quello proposto.

Prove di carica termica del serbatoio in condizioni reali di esercizio

Le prove sperimentali di carica dell'energia termica nel serbatoio sono riportate in Tabella 73.

Tabella 73. Elenco delle prove sperimentali di carica termica del serbatoio

Test n.	Temperatura sali [°C]		Portata sali [kg/s]
	$T_{iniziale}$	T_{finale}	
TC1	360	480	3,0
TC2	325	420	2,5
TC3	320	420	2,0
TC4	345	385	2,0
TC5	350	430	1,5
TC6	380	420	1,5
TC7	370	415	2,0
TC8	370	415	2,5
TC9	330	470	1,5

Le prove sono state eseguite con il generatore di vapore non funzionante (cioè non alimentato con acqua). All'inizio di ogni prova la pompa dei sali fusi, che aspira i sali “freddi” dal fondo del serbatoio, viene fatta funzionare a una portata elevata per un tempo sufficiente a ottenere una buona omogeneità nella temperatura della massa dei sali fusi contenuti nel serbatoio (si vuole cioè ottenere un’assenza di stratificazione iniziale della temperatura dei sali fusi); la portata dei sali fusi viene poi regolata al valore desiderato della prova (inizio della prova).

I sali freddi, aspirati dalla pompa di circolazione, fluiscono attraverso una caldaia elettrica esterna, dove la temperatura è aumentata rapidamente per effetto Joule fino al valore di prova e a questa temperatura rientrano nel serbatoio attraverso il bocchello posizionato vicino alla superficie (livello superiore) dei sali.

Queste condizioni vengono mantenute nel tempo e la prova dura fino a quando tutte le termocoppie che misurano le temperature di stratificazione raggiungono lo stesso valore, cioè fino a che il serbatoio torna a una temperatura elevata e omogenea. In Figura 196 sono riportati i risultati della prova TC9.

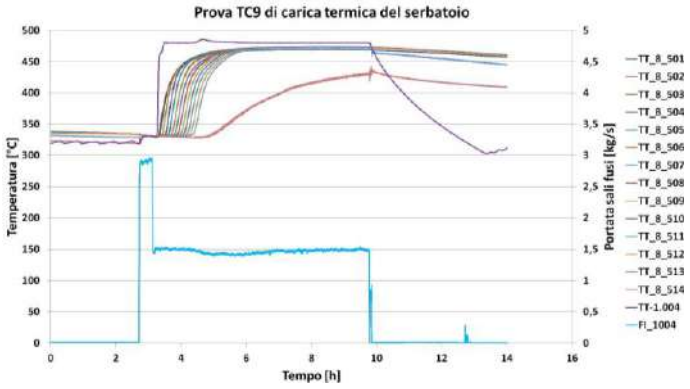


Figura 196. Andamento delle temperature di stratificazione e della portata dei sali fusi nella Prova TC9

All'inizio delle prove, le temperature risultano in genere lievemente stratificate come conseguenza della prova del giorno precedente; tuttavia basta anche meno di mezz'ora di funzionamento della pompa di circolazione dei sali per far sì che si raggiunga l'omogeneità nei valori delle temperature all'interno del serbatoio. Il sensore con sigla TT-1.004 (colore viola) registra la temperatura di uscita dalla caldaia elettrica, esterna al serbatoio, che riscalda la portata dei sali fusi fino alla desiderata temperatura di prova che corrisponde alla temperatura di ingresso nel serbatoio al livello della superficie libera dei sali; si può osservare che non appena il valore della temperatura dei sali viene incrementato con l'effetto Joule dalla caldaia elettrica, subito gli strati superiori del serbatoio rispondono scaldandosi e quindi i valori di temperatura misurati dalle termocoppie aumentano, ovviamente secondo l'ordine di profondità con il quale sono applicate le termocoppie stesse, ci vuole poco meno di un'ora perché l'effetto dell'ingresso dei sali caldi si senta fino alla penultima termocoppia (sigla TT_8_513), mentre l'ultima (sigla TT_8_514) (traccia marrone nei grafici) sale lentamente senza mai arrivare al valore delle altre.

Questi risultati mettono in risalto come l'ingresso dei sali fusi all'interno del serbatoio, agli strati più caldi ed elevati, deve essere progettato in maniera molto curata. Certamente non con un bocchello unico dal quale entra tutta la portata, come accade nel caso sperimentale, ma si può pensare di realizzare ad esempio un distributore circonferenziale ad anello, con ugelli di uscita dei sali posti lungo tutta la circonferenza e calcolati per basse velocità di uscita dei sali stessi, al fine di evitare in ogni modo, o quanto meno minimizzare, di perturbare la stratificazione innescatasi.

In ogni caso si è verificato che la stratificazione esiste e viene mantenuta stabile. Un'importante conseguenza di questo fatto è che, con un'alimentazione continua di energia termica, si può utilizzare il sistema proposto (configurazione a un solo serbatoio di accumulo con generatore di vapore integrato) che mantiene nel tempo due temperature limite ("calda" e "fredda"), al posto della configurazione classica con i due serbatoi di accumulo (serbatoio "caldo" e "freddo").

c.2 Installazione e prove preliminari di caratterizzazione del sistema cogenerativo innovativo con microturbina a vapore

Nell'ambito dello sviluppo di sistemi di produzione di energia elettrica integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia, le attività prevedevano l'installazione e le prove preliminari di caratterizzazione del sistema cogenerativo innovativo con microturbine a vapore. Le attività sono state svolte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Roma Tre.

Nel seguito vengono descritte le attività relative alla progettazione di un impianto di cogenerazione dimostrativo di piccola taglia con una microturbina a vapore da circa 1,5 kWe. Sono stati sviluppati gli schemi di dettaglio dei circuiti vapore e acqua e delle strumentazione e il computo dei componenti con una preliminare stima dei costi. E' stato inoltre eseguito il progetto preliminare di un generatore di vapore alimentato a sali fusi per l'alimentazione della micro turbina.

Nella fase di stesura del progetto preliminare era stata presa in considerazione, come prima ipotesi, l'utilizzo di una turbina Dresser-Rand da 15 kW alimentata dal generatore di vapore (300 kW), già esistente presso il C.R. Casaccia ed installato nel serbatoio. A seguito delle offerte pervenute per la turbina e la stima dei costi degli altri componenti d'impianto necessari, ci si è resi conto della incompatibilità con il budget disponibile e si è quindi optato per una soluzione equivalente dal punto di vista tecnologico e dimostrativo ma più economica.

La ricerca, svolta in collaborazione con L'Università, ha portato a selezionare una microturbina "Turney Turbines LTD" da 1,5 kW.

Si è passati quindi alla definizione dello schema di impianto del circuito vapore relativo alla macchina da 1,5 kW e la relativa strumentazione.

Si è focalizzata infine l'attenzione sulla soluzione del problema posto dalle caratteristiche del vapore richiesto dalla turbina: pressione 12 bar, temperatura 220 °C. Queste caratteristiche non consentono l'uso del generatore di vapore già esistente presso il C.R. Casaccia del tipo "*one through*" immerso nel serbatoio sali fusi. Pertanto è stato necessario studiare e progettare un nuovo generatore di vapore che rispondesse ai seguenti requisiti: produzione di vapore alle caratteristiche richieste, basso costo, semplicità costruttiva, alimentazione con acqua a temperatura ambiente senza necessità di preriscaldo dell'acqua di alimento evitando il problema della solidificazione dei sali binari nella zona di preriscaldo del generatore di vapore.

I generatori di vapore alimentati da sali fusi utilizzati negli impianti solari, presentano il problema della solidificazione dei sali il cui punto di cambiamento di fase è intorno ai 240 °C, qualora l'acqua di alimento sia a una temperatura inferiore a tale valore. Questo limite impone un preriscaldamento dell'alimentazione del generatore di vapore a livelli non inferiori a 240 °C. Si è quindi adottata una soluzione progettuale innovativa che prevede preriscaldatore, evaporatore surriscaldatore immersi in una miscela quaternaria di sali a basso punto di fusione, inferiore a 100 °C in un contenitore cilindrico ad asse verticale immerso nel serbatoio di accumulo dell'impianto solare contenete la miscela binaria alto fondente.

Il criterio seguito nella progettazione dell'impianto vapore è stato quello di realizzare un impianto funzionale idoneo ad una turbina di piccola potenza rispettando ovviamente i criteri di sicurezza e privilegiare la semplicità d'impianto con l'intento di recuperare parte dei componenti presenti nell'impianto PCS, quali ad esempio il condensatore ad aria e il serbatoio condense, allo scopo di ridurre i costi di investimento.

Per la scelta delle valvole di regolazione, di intercettazione e di sicurezza, viste le dimensioni delle tubazioni (½" lato alimentazione e da ¾" lato vapore), ci si è orientati verso elementi ad innesto rapido, tipo "Svagelok" per semplificare il montaggio del circuito, ridurne i tempi ed evitare saldature, in modo da aumentarne la flessibilità nel caso si rendesse necessario apportare modifiche in fase di sperimentazione. Per quanto riguarda le misure delle portate son stati adottati misuratori del tipo "Coriolis" che assicurano una certa affidabilità e precisione di misura.

L'impianto è dotato di by-pass della turbina, in modo da poter eseguire preliminarmente prove e messa a punto del generatore di vapore e di taratura del circuito senza interessare la turbina.

La turbina a vapore che è stata individuata e acquistata ha una potenza elettrica prodotta nominale di 1,5 kW, un decimo di quella che era stata prevista, con una portata nominale di acqua/vapore pari a 60 L/h (0,01667 kg/s), una pressione di lavoro di 1,2 MPa (temperatura di saturazione~188°C) e una temperatura di ingresso in turbina di 200 °C (quindi vapore leggermente surriscaldato, solo circa l'1%); ipotizzando, per turbine di tale taglia, un rendimento termico/elettrico molto basso e pari, per restare conservativi, al 10%, la potenza termica richiesta dalla turbina è di circa 15 kW_{th}. Questi parametri operativi, ai quali sarà necessario effettuare le prove sperimentali, sono incompatibili per la produzione diretta di vapore a quelle caratteristiche con il generatore di vapore esistente di cui sopra, che ha una potenza nominale di ben 300 kW per una portata d'acqua nominale di 0,123 kg/s.

Si potrebbe pensare di utilizzare questo generatore di vapore tramite la parzializzazione del suo fascio tubiero, utilizzando cioè uno solo dei tre tubi di cui è composto (scendendo così a 1/3 di 0,123 kg/s = 0,041 kg/s e poi diminuendo la portata di circa il 40% per arrivare al valore richiesto), e producendo vapore a più alta pressione e temperatura per poi laminarlo portandolo così alle condizioni richieste. Si dovrebbe pertanto preriscaldare l'acqua almeno fino a 230 C (a una pressione minima di 2,8 MPa, che è la pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di ingresso) e quindi inviarla nel generatore di vapore, da dove uscirebbe in condizioni surriscaldate per poi essere laminato fino alle condizioni desiderate per le prove. Sono necessari pertanto un preriscaldatore elettrico esterno per preriscaldare l'acqua di alimento e una valvola di laminazione appropriata. Il sistema è pertanto un sistema da gestire e controllare attivamente.

Si è pensato invece a un sistema più semplice che fosse in grado di produrre vapore surriscaldato a costi contenuti e di semplice gestione, senza parti attive da regolare. Si è allora ritenuto opportuno studiare, progettare e far realizzare un altro generatore di vapore, molto semplice nella sua concezione e costituito da un tubo di scambio a conformazione elicoidale immerso in un cilindro di acciaio a sua volta completamente immerso nei sali del serbatoio di accumulo (generatore di vapore "a pozzo"). Il cilindro contiene una miscela quaternaria di sali fusi che, rispetto alla miscela binaria contenuta nel serbatoio, hanno il vantaggio di solidificare al di sotto dei 100 °C. La

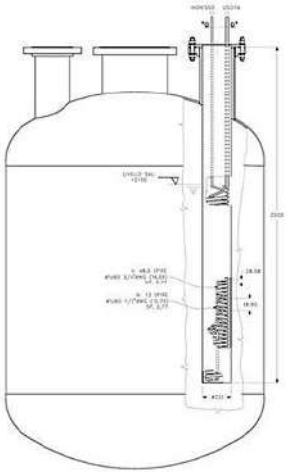


Figura 197. Vista d'insieme del serbatoio sali e del generatore di vapore "a pozzo"

miscela quaternaria costa più della miscela binaria, ma il vantaggio che dà con la sua proprietà di fondere/solidificare intorno ai 95°C ripaga della spesa aggiuntiva, che peraltro è bassa considerando la piccola quantità di sali necessaria (~100 kg).

In dettaglio, lo schema del generatore di vapore che si propone di realizzare è mostrato in Figura 197. I vantaggi di un tale sistema di generazione di vapore asservito a una piccola turbina per la produzione di energia elettrica per uso di emergenza o di back-up di una centrale a sali fusi risiedono nel fatto che è possibile far circolare l'acqua direttamente a temperatura ambiente, cioè senza necessità di un preriscaldamento, e quindi dovrebbe essere un sistema rapido sia in avvio che in fermata, senza necessità di troppe regolazioni esterne ma legato solo all'avvio della pompa di circolazione dell'acqua e, ovviamente, ai tempi di avvio della turbina (tempi che evidentemente però sono gli stessi degli altri sistemi a vapore).

La prosecuzione delle attività riguarderà: approvvigionamento e montaggi dei componenti individuati per la realizzazione del circuito vapore, installazione della turbina e commissioning del circuito; approvvigionamento del nuovo generatore di vapore, montaggio sull'impianto e commissioning; definizione della matrice sperimentale e esecuzione prove; analisi dei risultati.

Le attività di ricerca svolte dall'Università di Roma Tre si sono articolate in diverse fasi, a partire dal rilievo dell'attuale configurazione della linea vapore dell'impianto Prova Collettori Solari presente in ENEA, fino alla definizione e alla progettazione dell'impianto dimostratore basato sulla microturbina a vapore. Una volta individuate le problematiche impiantistiche e operative connesse alla realizzazione dell'impianto, è stato definito il circuito vapore e sono state scelte le relative apparecchiature.

In una prima fase sono state definite le caratteristiche di un impianto a vapore sperimentale nell'intervallo di potenza 10-20 kWe, studiato per essere alimentato dal generatore di vapore attualmente in funzione presso l'impianto sperimentale PCS-ENEA. In una seconda fase, alla luce di quanto ricavato dall'attività di studio e progettazione, e anche in considerazione dell'impegno economico per la realizzazione dell'impianto è stato progettato un dimostrativo di piccolissima taglia, nel campo 0-2 kWel. Questa scelta, senza pregiudicare la qualità della sperimentazione sull'impianto a vapore, ha consentito una sostanziale riduzione dell'investimento. Si è inoltre presentata l'opportunità di predisporre lo sviluppo di un piccolo generatore di vapore, integrato nel serbatoio di accumulo sali, in grado di fornire vapore a temperature relativamente basse, estendendo il campo di applicazione dei generatori di vapore operanti con sali fusi.

Il circuito vapore dell'impianto PCS si basa su un generatore di vapore integrato nel serbatoio di accumulo sali. I principali componenti del sistema sono i seguenti:

1. Serbatoio di accumulo sali con generatore di vapore integrato
2. Separatore di vapore
3. Condensatore
4. Riscaldatore ausiliare elettrico
5. Pompa volumetrica acqua di alimento
6. Valvole di regolazione della pressione
7. Valvole di sicurezza e di by-pass
8. Strumentazione.

Allo stato attuale il vapore prodotto dall'impianto viene laminato e condensato, non essendo presenti impianti convertitori o altre utenze. In Tabella 74 sono riportate le condizioni di funzionamento del generatore di vapore, significative per la progettazione dell'impianto motore con turbina.

Il vapore viene reso disponibile alle pressioni di 55 e 40 bar, mentre i diversi livelli di surriscaldamento sono legati alla temperatura dei sali fusi all'interno del serbatoio d'accumulo.

Con riferimento ad un assetto cogenerativo dell'impianto a vapore, le condizioni al condensatore (pressione 0,701 bar assoluti e 90 °C) sono determinate dai livelli di temperatura dell'acqua di refrigerazione. In particolare, è stato scelto l'intervallo di temperatura di dieci gradi compreso fra 70 e 80°C, rappresentativo delle usuali applicazioni nei settori agricolo, alimentare e industriale. D'altra parte si assume che, per finalità sperimentali, l'impianto venga corredato di uno scambiatore aerotermo che assolva le medesime funzioni del carico. E' stato anche preso in considerazione un assetto di cogenerazione che prevede di portare la temperatura di condensazione a 60°C.

Tabella 74. Condizioni al generatore e al condensatore

Temperatura sali fusi [°C]	Temperatura Vapore[°C]	Pressione [bar]
450	380	55, 40
	280	
	280	
500	430	
	320	
	280	
550	490	
	400	
	280	
Cogenerazione ad "alta" temperatura		
Acqua di refrigerazione	Temp. "in" [°C]	Temp. "out" [°C]
	70	80
Aerotermo	Temperatura aria esterna [°C]	
	30	
Cogenerazione a "bassa" temperatura		
	Temp. "in" [°C]	Temp. "out" [°C]
Acqua di refrigerazione	40	50
	Temperatura aria esterna [°C]	
Aerotermo	30	

In Figura 198 è riportato lo schema funzionale dell'impianto motore a vapore, evidenziandone i componenti principali. Tramite una linea in derivazione, il generatore di vapore viene collegato al turbogeneratore, equipaggiato con l'apparecchiatura per l'immissione in rete elettrica. Il vapore scaricato dalla turbina è condensato alla pressione atmosferica. Il condensatore è alimentato con acqua di refrigerazione messa a disposizione da una utenza sottoposta in assetto cogenerativo. In caso di indisponibilità dell'utenza cogenerativa, si inserisce nel circuito lo scambiatore aerotermo. L'estrazione delle condense avviene mediante un gruppo pompa, che le riporta fino al pozzo caldo collegato alla linea di alimento ad alta pressione. L'estrazione degli incondensabili è realizzata con un dispositivo apposito.

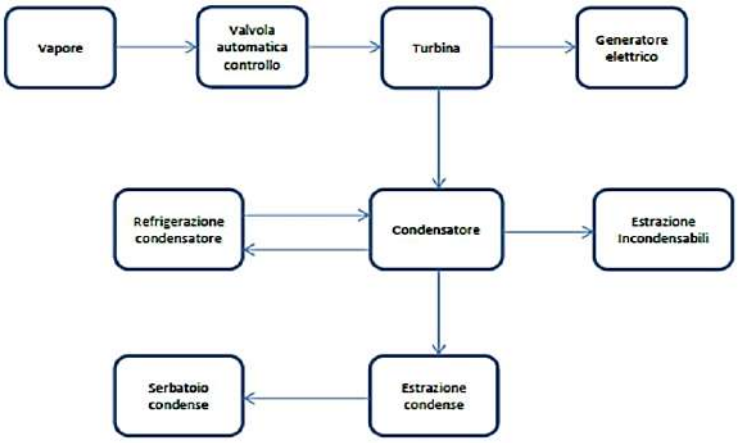


Figura 198. Schema funzionale dell'impianto motore a vapore

L'impianto è dotato dei dispositivi di sicurezza richiesti dalle normative vigenti e in particolare della valvola di sicurezza per il vapore posizionata allo scarico della turbina e della valvola di sicurezza sulla linea acqua di raffreddamento del condensatore (condensatore ad acqua). E' inoltre inserita un'ulteriore valvola di sicurezza per vapore a bassa pressione sulla linea delle tenute turbina.

Il sistema di gestione dell'impianto provvede ad arrestare automaticamente l'afflusso di vapore in ingresso alla turbina nel caso di anomalie riscontrate dal sistema di controllo sulla linea vapore o acqua di raffreddamento del condensatore, o nel caso di attivazione manuale del segnale di arresto d'emergenza da parte dell'operatore, mettendo in sicurezza l'intero sistema.

La scelta dell'area per l'installazione della turbina risponde alla disposizione del generatore di vapore, collocato all'interno del serbatoio di accumulo sali fusi. E' stata individuata un'area libera in prossimità del serbatoio di accumulo, idonea sotto diversi punti di vista a ospitare il turbogeneratore; essa permette l'accesso alle

apparecchiature necessarie alle operazioni di installazione e manutenzione, consente di limitare il percorso della tubazione vapore e offre la possibilità di installare componenti dell'impianto che richiedono adeguato riparo o protezione (strumentazione, quadri elettrici).



Figura 199. Turbogeneratore a vapore di piccola taglia (Sissons)

Per la scelta del turbogeneratore si è fatto riferimento ai costruttori di turbine a vapore in grado di fornire macchine nella fascia di potenza fino a circa 15 kW. Dall'indagine iniziale sono emerse diverse possibilità, prese in considerazione tanto dal punto di vista tecnico quanto dal punto di vista economico, è stato individuato un turbogeneratore da 1,5 kWel, basato su una microturbina industriale (Figura 199), che risultata interessante e idonea all'applicazione. In particolare essa consente la realizzazione di un impianto che utilizza vapore di qualità significativa, ma caratterizzato da una richiesta portata sensibilmente più modesta rispetto a quella necessaria all'impianto di taglia maggiore.

La Figura 200 mostra la turbina a vapore inserita nell'impianto, sono evidenziate le valvole necessario all'installazione.

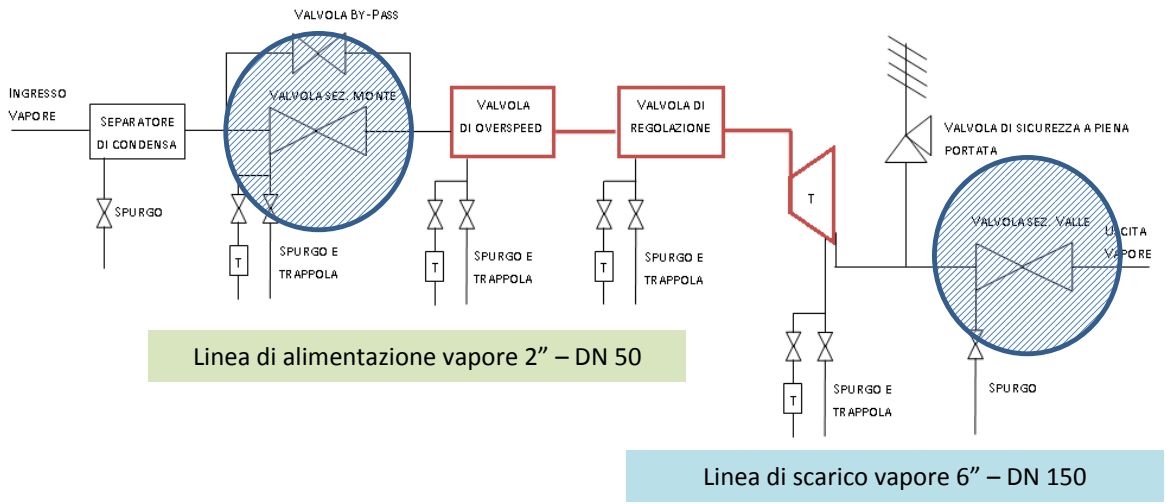


Figura 200. Schema semplificato di collegamento della turbina a vapore

A bordo macchina sono già presenti la valvola di regolazione principale e la valvola di overspeed, rappresentate con tratto rosso a maggior spessore; poiché queste valvole sono azionate automaticamente e per via esclusivamente meccanica, non richiedono il collegamento al sistema di controllo gestito dal PLC

Il collegamento della turbina a vapore richiede l'installazione di due valvole di sezionamento monte e valle macchina, di un separatore si condensa, di una valvola di sicurezza a piena portata e di quattro gruppi scaricatori di condensa, come evidenziato in figura.

Si è ritenuto opportuno dotare la linea vapore di una valvola di regolazione della portata motorizzata e gestita dal PLC. Con tale equipaggiamento è possibile gestire le fasi di riscaldamento, di avviamento, di modulazione e di arresto in modo automatico e ripetibile.

A valle della turbina, l'elemento principale è costituito dal condensatore (dotato di sistema per l'estrazione degli incondensabili), corredato da uno scaricatore e da un pozzetto di raccolta (Figura 201).

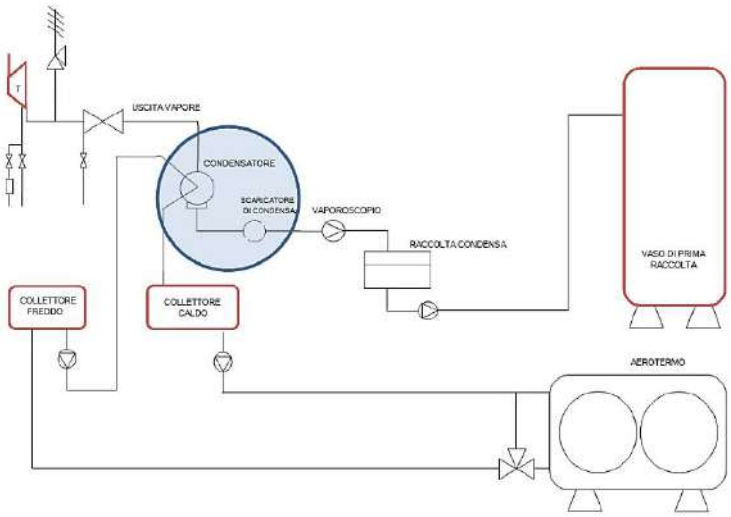


Figura 201. Schema semplificato d'impianto lato condensa

I parametri funzionali dell'impianto (pressione, temperatura, portate e livelli) sono trasmessi in continuo al PLC dalla strumentazione installata a bordo impianto e sono utilizzati per l'esecuzione delle logiche automatiche d'impianto. Il sistema è strutturato per registrare in continuo i parametri di funzionamento e per effettuare la verifica di eventuali anomalie o valori d'esercizio non rispondenti ai valori di progetto.

Il sistema di automazione è ospitato in un armadio elettrico generale completo di PLC e di fronte-quadro con pulsanti e selettori per i comandi manuali. In armonia con le attuali applicazioni in ambito industriale, si ritiene necessario prevedere un pannello operatore multifunzione di tipo "touch", dedicato al controllo e alla parametrizzazione completa della macchina.

Il sistema di automazione impianto viene inoltre completato da un "pannello operatore grafico" per la gestione locale e remota da parte dell'operatore di tutti i dati operativi inerenti l'automazione delle macchina. In tal modo è possibile affiancare la supervisione dell'impianto a vapore a quella dell'attuale impianto PCS.

Le attività svolte hanno consentito di valutare l'influenza della taglia di potenza sui costi di realizzazione dell'intero impianto. Le attività hanno messo in evidenza che la realizzazione dell'impianto motore nella fascia di potenza 10-20 kW è economicamente impegnativa, sia a causa del costo della turbina, sia del costo dei componenti dell'impianto; più in dettaglio, il costo complessivo per la realizzazione dell'impianto di taglia 15 kW si attesta intorno ai 14.000 €/kW, da ripartire per circa il 30% sull'approvvigionamento del turbogeneratore e per il restante 70% sull'approvvigionamento dei restanti componenti d'impianto. Senza pregiudicare la qualità del vapore prodotto, si è scelto di realizzare l'impianto sulla base di un turbogeneratore particolarmente piccolo basato su micro-turbina industriale, grazie al quale è possibile beneficiare di una forte riduzione dei costi.

Il layout dell'impianto, vista la ridotta potenza, può essere semplificato sia nella tipologia dei componenti, sia nella logica di gestione.

Per approfondimenti sulle attività svolte da ENEA e dall'Università di Roma Tre si rimanda ai rapporti RdS/PAR2013/233, RdS/PAR2013/234 e RdS/PAR2013/135.

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 temine.

ENEA partecipa inoltre alle iniziative e 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).

A marzo 2014 si è svolta a Riyadh e a Jeddah (Arabia Saudita) la "Missione Imprenditoriale" Italiana organizzata congiuntamente dai Ministeri degli Esteri e dello Sviluppo Economico, dalla Confindustria, dall'Istituto per il Commercio Estero (ICE) e dal Gestore del Sistema Elettrico (GSE), con la partecipazione di oltre 70 aziende italiane. Inizialmente programmata come "Missione Governativa", la missione è stata successivamente trasformata in "Missione Imprenditoriale" a causa dell'avvicendamento dell'esecutivo italiano avvenuto proprio nel periodo della missione. Scopo della missione è stato il rafforzamento delle relazioni bilaterali finalizzato ad incrementare l'export commerciale italiano in Arabia Saudita con particolare riferimento ai due settori dell'energia e dei servizi ed equipaggiamenti biomedicali.

L'ENEA è stata invitata a partecipare per l'interesse manifestato dai sauditi nello sviluppo delle energie rinnovabili con riferimento al fotovoltaico e al solare termico a concentrazione. In quest'ultimo settore l'ENEA ha infatti sviluppato una variante tecnologica basata su accumulo termico con sali fusi che rappresenta al momento una delle soluzioni tecniche più avanzate e promettenti. L'Arabia Saudita ha avviato un importante programma di investimento per la costruzione di oltre 10 GW di potenza elettrica basata su solare termico a concentrazione, da installare entro il 2032 mediante una procedura di Procurement competitivo. La selezione dei progetti e delle offerte di collaborazione è gestita dal KA CARE-King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy, Agenzia governativa saudita istituita nel 2010 per lo sviluppo delle fonti energetiche alternative e del nucleare.

L'ENEA ha avuto modo di presentare ai sauditi le proprie attività e potenzialità e, al contempo, di supportare negli incontri bilaterali le aziende italiane operanti nel settore, in particolare Archimede Solar Energy che, su brevetti ENEA, produce tubi ricevitori ad alta temperature per impianti solari a concentrazione.

Nella sessione plenaria dedicata all'energia è stata presentata la tecnologia italiana sul CSP ed il ruolo dell'Agenzia nel suo sviluppo ed sono stati quindi stabiliti contatti diretti con il Responsabile degli Affari Internazionali del KA CARE preposto alla valutazione delle proposte nell'ambito del Procurement competitivo di cui sopra. In base alle informazioni raccolte, il processo di valutazione delle proposte dovrebbe concludersi entro la fine del 2014.

Nel corso del 2014 ENEA ha inoltre partecipato al Meeting SEII (Solar Energy Industrial Initiative) e a riunioni dell'Implementing Agreement dell'IEA SolarPACES.

Nell'ambito del Meeting SEII è stato illustrato il primo work program su energia di Horizon 2020. Una sessione è stata dedicata a Solar-ERA.net, programma attraverso il quale la Comunità finanzia programmi su tematiche specifiche collegate al piano d'azione dell'iniziativa industriale. Purtroppo l'Italia non riesce ad accedere a questi fondi in quanto la partecipazione alle attività deve essere gestita da una regione e nessuna sembra interessata.

La Piattaforma tecnologica europea sul fotovoltaico ha presentato un position paper sul futuro della tecnologia in Europa. Ampia discussione è stata dedicata all'implementation plan della tecnologia CSP. La sua approvazione è stata rinviata a procedura scritta per tener conto di tutte le notazione rilevate.

L'Implementing Agreement dell'IEA SolarPACES, si occupa specificamente di tecnologia solare termodinamica e di produzione di combustibili di origine solare per via termica. SolarPACES riunisce esperti di 20 paesi e comprende 6 Task operativi (Impianti, Chimica Solare, Tecnologia dei componenti, Calore di processo, Risorse solari, Dissalazione solare). Il Comitato Esecutivo (ExCo) di SolarPACES si riunisce due volte l'anno, una delle quali in occasione della Conferenza annuale.

Tramite la partecipazione a SolarPACES anche altre realtà operative nazionali nel campo della ricerca sul solare termodinamico a concentrazione hanno la possibilità di partecipare alle attività dei Task; in particolare quest'anno hanno partecipato il Politecnico di Torino e Milano e la società Archimede Solar Energy (ASE).

La partecipazione ai diversi gruppi di lavoro ha particolare importanza soprattutto per mantenere l'aggiornamento e poter influire sulla predisposizione delle linee guida e degli standard normativi, che vengono poi normalmente recepiti in sede di normativa internazionale (IEC e AENOR).

L'ENEA partecipa attivamente alla riunioni del Comitato Esecutivo ed è presente con propri ricercatori nei Task I (Impianti), II (Chimica solare) e III (Componenti). Nel seguito si riporta una breve sintesi delle attività 2014.

Task I

La riunione del Task I, svoltasi il 15 settembre 2014, è stata presieduta dell'NREL (USA); la riunione si è focalizzata sul nuovo gruppo di lavoro dedicato all'analisi delle problematiche dell'integrazione degli impianti solari a concentrazione nelle reti elettriche.

Poiché in generale la tecnologia fotovoltaica consente un costo livellato dell'energia inferiore a quello della tecnologia CSP, ma tende a "saturare" la rete elettrica nell'intorno del picco di produzione diurno, è essenziale sfruttare la capacità del CSP di produrre energia "dispacciabile" tramite la presenza del sistema di accumulo; in

particolare posponendo la produzione alle ore serali. Emerge la necessità di "quantificare il valore per la rete" della produzione CSP, che comprenda sia il valore dell'energia che il credito in termini di capacità e di fornitura di servizi ancillari quali la regolazione di frequenza; questo è l'obiettivo di un nuovo gruppo di lavoro recentemente istituito nell'ambito Task I. Nel corso della riunione, ENEA ha presentato il risultato di uno studio, pubblicato come ENEA/RT/2014/08 e sulla rivista EAI n. 4 – 2014, che analizza il recente impatto sulla rete elettrica italiana delle fonti rinnovabili e le prospettive al 2020, 2030 e 2050 sulla base dei target nazionali ed europei.

Task II

Al Task II ENEA ha partecipato per l'Italia presentando una relazione sulle attività nazionali sulla chimica solare. Il Task II sta predisponendo una serie di *Roadmaps to solar fuels* (che analizzano il potenziale di medio termine per il passaggio alla fase di mercato per i solar fuels prodotti da solare a concentrazione, coinvolgendo nell'ambito di riunioni tecniche rappresentanti industriali (ad esempio delle compagnie petrolifere o di grandi gruppi operanti nel settore chimico) e ricercatori esperti di solar fuel. La Roadmap di SolarPACES è attualmente nella fase 2 (esportazione di solar fuels da Australia a Asia; Sud Africa). La Fase 3 comporterà invece la Solar fuel roadmap per la Cina. Esiste anche una Roadmap to solar fuels europea in STAGE-STE.

E' stato anche proposto di fare un assessment sulle tecnologie più promettenti che si possano realizzare a breve come "sistema completo" (quindi non solo componenti in fase di R&S quali ricevitori solari o processi termochimici) per realizzare dei prototipi, sottoporlo a un comitato e rivedere il risultato ogni 3 anni.

Task III

Nel Task III ENEA sta partecipando ai gruppi di lavoro che stanno mettendo a punto le linee guida sulla misura della riflettanza degli specchi e delle caratteristiche ottiche degli stessi sia in laboratorio che in campo; in particolare ENEA coordina il gruppo sulla misura della riflettanza, costituito da 8 produttori di specchi solari e 6 enti di ricerca (ENEA, CEA, CENER, CIEMAT, DLR, ISE) e partecipa al gruppo di lavoro che sta predisponendo linee guida sulla misura delle prestazioni dei nuovi prototipi di sistemi di accumulo termico.

ENEA ha anche fornito un contributo al gruppo di lavoro sulla misura delle prestazioni termiche dei ricevitori lineari. Le attività in ambito Task III hanno una notevole importanza in vista della predisposizione della normativa internazione (IEC e AENOR).

Per maggiori informazioni sulle attività svolte all'interno delle iniziative sopra descritte si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/235.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Alcune delle attività descritte nel precedente capitolo sono state condotte in collaborazione con strutture universitarie. Nel seguito si riportano il titolo ed i contenuti degli accordi di collaborazione stipulati con le diverse università.

Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

"Studio, produzione e caratterizzazione di un nanoPCM, sia in forma massiva che micro incapsulata, con temperatura di fusione prossima a 220°C"

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Perugia, inserita nell'obiettivo b.2 ha riguardato in particolare la selezione e produzione di un nanoPCM con temperatura di fusione prossima ai 200-250°C da utilizzare in moduli base di accumulo per la sperimentazione in un circuito messo a punto presso i laboratori dall'ENEA. L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2013/227.

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

"Studio del comportamento di elementi di accumulo di calore in calcestruzzo con impostazione ed interpretazione dei test sperimentali"

L'attività di ricerca effettuata dall'Università di Padova è inserita negli obiettivi b.3 "Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione" e b.4 "Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo". L'attività è descritta nei rapporti RdS/PAR2013/229 e RdS/PAR2013/231.

Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria

"Studio e messa a punto di un impianto a vapore, per la produzione di energia elettrica, alimentato dall'impianto solare PCS dell'ENEA-Casaccia"

L'attività di ricerca svolta dall'Università degli studi Roma Tre è inserita nell'obiettivo c.2 "Installazione e prove preliminari di caratterizzazione del sistema cogenerativo innovativo con microturbina a vapore", ed ha riguardato la progettazione e realizzazione di un impianto a vapore alimentato da sistemi di accumulo termico a sali fusi di impianti solari a concentrazione. L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2013/234.

Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

"Studio e caratterizzazione di calcestruzzi per l'accumulo di calore sensibile per media temperatura, con produzione di elementi strumentati per campagna sperimentale"

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Trento è inserita nell'obiettivo b.4 "Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo", ed ha riguardati lo studio e lo sviluppo di nuove mescole di calcestruzzo per utilizzo come sistema di accumulo a media temperatura (250-300°C), e la produzione di moduli base di accumulo per la sperimentazione in un apposito circuito messo a punto presso i laboratori dall'ENEA. L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2013/232.

Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Il mare racchiude in sé diverse forme di energia: il moto ondoso, le correnti di marea, le correnti marine e i gradienti di temperatura e salinità. Ognuna di queste fonti di energia è distribuita in maniera non uniforme sul globo terrestre e richiede una specifica tecnologia per la conversione in energia elettrica. Tutti i sistemi di conversione dell'energia derivata dal moto ondoso finora sviluppati sono stati progettati per operare in condizioni di mare aperto. Nel caso dell'Italia è necessario cercare di sviluppare dispositivi che siano in grado di sfruttare caratteristiche differenti dall'altezza delle onde stesse.

Ad oggi l'energia dal mare copre all'incirca lo 0,02% della domanda energetica europea, tuttavia all'interno dell'evoluzione delle energie rinnovabili, l'energia dal mare sta sempre più emergendo come una fonte alternativa che può contribuire agli obiettivi strategici prefissati dall'Unione Europea per il 2020 ed il 2050.

Recentemente la Commissione Europea ha auspicato, attraverso la comunicazione "Renewable energy: a major player in the European energy market" (COM/2012/271), una maggiore priorità alla ricerca sull'energia dal mare. Tale priorità è stata ribadita nella comunicazione "Blue Growth" (COM/2012/494) in cui l'energia dal mare è indicata come uno dei cinque pilastri della così detta "Blue Economy". Di recente la European Ocean Energy Association (EU-OEA) ha stimato che la potenza istallata di dispositivi per la conversione dell'energia dal mare in Europa potrebbe raggiungere i 3,6 GW entro il 2020 e balzare a quasi 188 GW entro il 2050.

Le tecnologie rivolte allo sfruttamento delle correnti di marea e delle onde sono a uno stato di maturità che possiamo definire importante, mentre quelle per lo sfruttamento dei gradienti termici e salini sono in una fase ancora iniziale e di difficile implementazione su scala commerciale nel breve periodo. I dispositivi in grado di generare energia elettrica sfruttando il moto ondoso vengono comunemente denominati *Wave Energy Converters* (WEC), ed utilizzano uno specifico sistema di *power take off* (di estrazione dell'energia). Vari WEC sono stati progettati e sottoposti a prova a scala di modello; alcuni sono stati anche sperimentati in piena scala in mare.

La ricerca in ambito italiano nel campo dell'energia dal mare è particolarmente attiva 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 di attività di ricerca, sebbene l'attenzione e l'interesse da parte degli investitori siano crescenti nel tempo lasciando prevedere interessanti possibilità per il futuro.

Nell'ambito del presente progetto si vuole affrontare lo studio e l'analisi delle tecnologie dei sistemi di conversione del potenziale energetico marino, con il duplice obiettivo di proporre nuove soluzioni tecnologiche specifiche per i mari italiani, e di ottimizzare alcuni prototipi, particolarmente promettenti, già realizzati da altre realtà italiane.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività svolta ha avuto come finalità la costruzione e verifica di funzionamento di due prototipi di convertitori del moto ondoso, specificatamente progettati per lavorare in condizioni di mare tipiche della costa italiana.

Il primo prototipo realizzato è costituito da un sistema galleggiante che opera in condizioni di risonanza basato su un sistema oscillante passivo. E' stata inizialmente realizzata una modellazione matematica del sistema passivo di conversione dell'energia delle onde ricercando i parametri progettuali e di regolazione per massimizzarne la produttività. Sulla base dei risultati ottenuti è stato realizzato un prototipo in scala 1:45 le cui prestazioni sono state successivamente testate attraverso specifiche campagne di misure condotte presso la vasca navale del Politecnico di Torino.

Il secondo prototipo realizzato è del tipo a colonna d'acqua oscillante. Il prototipo è stato realizzato in scala 1:8 ed installato in mare aperto presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Il prototipo è formato da una parte attiva, costituita da un cassone metallico, per l'assorbimento dell'energia del moto ondoso,

e una parte fissa in cemento armato, poggiata sul fondo, che rappresenta il supporto necessario alla camera di assorbimento. Il cassone metallico è stato realizzato in modo da conferirgli un'elevata modularità: il cassone è infatti dotato di setti mobili che consentono di modificare la sua geometria interna. Contemporaneamente alla realizzazione del cassone modulare, sono state condotte attività sperimentali su un modello in scala 1/8 di un cassone non modulare, già disponibile presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Le attività sperimentali sono state affiancate da un'attività di modellistica numerica volta alla realizzazione di modelli CFD per lo studio fluidodinamico del sistema aria-acqua all'interno del cassone di un dispositivo U-OWC iniziato nel corso della precedente annualità.

I parametri solitamente forniti dai modelli su tutto il dominio di calcolo sono rappresentati da valori integrati, ricavati dallo spettro di energia delle onde. Con questi dati è quindi possibile produrre stime delle grandezze medie e in particolare dell'energia disponibile. La valutazione dell'energia prodotta da un convertitore richiede invece l'utilizzo dell'intero spettro bidimensionale (funzione della frequenza e della direzione) di energia, insieme alle caratteristiche specifiche del convertitore. La capacità nominale installata rappresenta il limite superiore dell'energia che un convertitore può produrre e corrisponde alla quantità totale di energia che produrrebbe se operativo in condizioni ottimali per tutto il tempo. La potenza prodotta da un generatore è funzione della capacità nominale installata e delle condizioni del sito. La produzione di energia è limitata da un numero elevato di parametri di funzionamento, quali ad esempio l'intensità minima delle onde necessaria alla produzione di energia ed il valore massimo utilizzabile, oltre il quale il generatore viene disattivato per evitarne la rottura. Queste limitazioni nella produzione di energia sono definibili in termini di intervalli di frequenza, energia e direzione. Parallelamente all'attività di progettazione e valutazione del funzionamento dei due prototipi, l'attività di ricerca è stata integrata con la produzione degli spettri bidimensionali climatologici ricavati da modelli numerici, su una serie di punti selezionati.

Le metodologie GIS costituiscono ormai un fondamentale e irrinunciabile supporto non solo nella gestione dei dati territoriali e geografici, ma anche (e soprattutto) nelle fasi di studio ed analisi dei fenomeni ambientali e territoriali, ai fini della comprensione delle loro caratteristiche e dinamiche. A tal fine, nell'ambito delle attività di comunicazione e diffusione dei risultati, è stato sviluppato un DSS (*Decision Support System*) di tipo GIS-based, finalizzato alla rappresentazione dei dati e delle informazioni territoriali, alla loro condivisione con utenti a vario livello ed a fornire supporto alla pianificazione delle nuove installazioni, al sistema previsionale ed alla gestione delle infrastrutture esistenti.

Le attività del progetto si articolano in quattro obiettivi intermedi, corrispondenti a diverse linee di ricerca, più un obiettivo specifico relativo ad attività di comunicazione e diffusione dei risultati:

a. Calcolo di indicatori di produttività energetica a partire dal clima ondoso
b. Attività sperimentale su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC
c. Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC
d. Studio delle prestazioni di un dispositivo di tipo point absorber "attivo" in scala reale, e progettazione di un sistema oscillante "passivo" per il recupero di energia dal moto ondoso
e. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Calcolo di indicatori di produttività energetica a partire dal clima ondoso

Allo scopo di determinare la possibilità di utilizzare l'energia contenuta nelle onde come fonte rinnovabile, è necessario disporre di una accurata quantificazione della risorsa. Nel corso delle annualità precedenti dell'Accordo di Programma è stata realizzata una climatologia del moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo, utilizzando il modello WAve prediction Model (WAM) alla risoluzione spaziale di 1/16°. Tale climatologia copriva un arco di tempo di 10 anni. L'interesse che tale prodotto ha suscitato all'interno della comunità degli esperti nei convertitori di energia dal mare, ha suggerito di realizzare una nuova climatologia ad una risoluzione più elevata ed estesa su un maggiore arco temporale. I risultati ottenuti per questo obiettivo sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/167.

Nel corso di questa annualità è stata quindi generata una climatologia ad alta risoluzione e di lungo periodo, per l'intero bacino Mediterraneo. Il modello numerico WAM per la simulazione del moto ondoso è stato utilizzato alla risoluzione di 1/32° per produrre una climatologia delle onde della durata di 25 anni, dal 1980 al 2004. Lo spettro di densità di energia è stato discretizzato utilizzando 36 direzioni angolari, corrispondenti ad una risoluzione angolare di 10°, e 32 intervalli di frequenza, che aumentano con progressione logaritmica a partire da 0,05 Hz.

Sono sati utilizzati come forzante superficiale i venti provenienti da una simulazione di un modello atmosferico regionale, forzato a sua volta dalle analisi del Centro Europeo per le Previsioni a Medio termine (ECMWF).

Dalle mappe medie mensili di altezza significativa e di energia risulta evidente la forte stagionalità. Si riporta in Figura 202 la mappa climatologica dell'energia ricavata per la stagione invernale, in cui si riscontrano i valori più elevati.

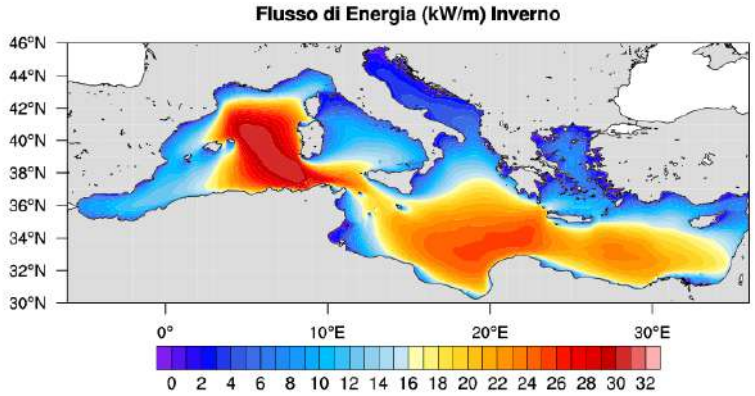


Figura 202. Climatologia del flusso di energia per la stagione invernale

Oltre alle grandezze integrate, quali altezza significativa dell'onda e direzione, in uscita dal modello WAM sono stati memorizzati, con frequenza oraria, gli spettri bidimensionali per 20 punti lungo la costa del bacino, mostrati nella Figura 203.

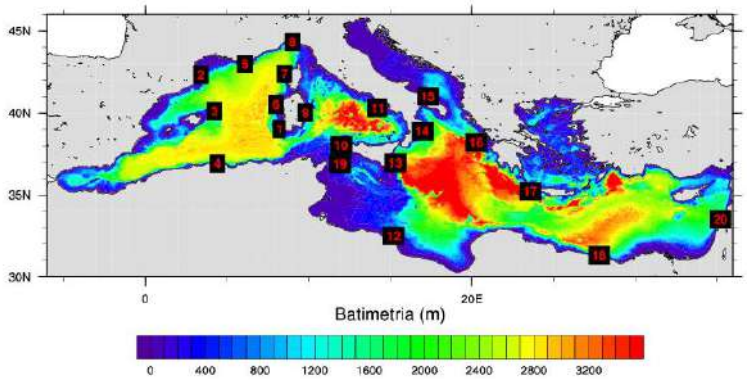


Figura 203. Le posizioni dei siti per i quali è stato memorizzato lo spettro bidimensionale sono mostrate sulla batimetria utilizzata dal modello WAM

Sono stati calcolati gli spettri ottenuti mediando nelle due dimensioni, frequenza e direzione. I valori massimi di energia vengono raggiunti nei tre mesi invernali, ampiezze di poco inferiori si possono osservare sia durante i mesi di marzo e aprile che nel mese di novembre. L'energia raggiunge i valori più elevati nelle zone occidentali della Sardegna e della Sicilia e a nord di Pantelleria, dove le basse frequenze indicano la prevalenza delle onde di lungo periodo che si propagano a partire dalla zona nord del bacino. La frequenza del picco di energia si sposta verso valori più alti all'inizio dell'autunno in corrispondenza dello svilupparsi di forzanti locali. L'estate è caratterizzata da bassissimi valori di energia a frequenze significativamente più alte. Le differenze tra i diversi mesi risultano ridotte nella zona ligure dove si generano onde di vento durante la maggior parte dei mesi.

Per alcuni siti è stata calcolata la produttività annua in funzione della potenza installata. Allo scopo di ottenere una quantificazione realistica della produzione annua, i valori degli spettri per tutto il periodo della simulazione sono stati analizzati introducendo una selezione sui principali fattori che determinano la riduzione dell'energia prodotta dai convertitori, rispetto a quella totale contenuta nelle onde.

Un primo elemento che è stato considerato è l'intervallo di funzionamento del dispositivo, compreso tra la soglia minima sotto la quale il dispositivo non è in grado di attivarsi e il valore massimo oltre il quale il dispositivo deve essere disattivato al fine di impedire danni all'apparato.

I dati degli spettri bidimensionali di alcune delle postazioni selezionate nei mari italiani, sono stati utilizzati per effettuare una prima stima della produzione di energia annua tendo conto delle soglie di funzionamento, considerando tre diversi livelli pari rispettivamente al 10, 20 e 30%.

L'energia che può essere realmente prodotta da un dispositivo non è però solo limitata dalle soglie di funzionamento inferiore e superiore. I convertitori di energia da moto ondoso, sono di diverse tipologie; in generale la loro capacità di produrre energia è vincolata al verificarsi di alcune condizioni in termini di frequenza dell'onda incidente e di direzione di provenienza. Taluni convertitori, di tipo puntuale, sono in grado di allinearsi in modo da poter convertire l'energia proveniente da qualsiasi direzione. Allo scopo di effettuare una valutazione della reale produttività dei siti analizzati, sono stati considerati tre scenari, per ognuna delle tre percentuali di funzionamento, che prevedono la selezione di frequenze di funzionamento all'interno dell'intervallo tra 0,05 e 0,15 Hz. Per quanto riguarda l'angolo di propagazione è stato considerato un caso senza limiti nelle direzioni e due casi rispettivamente selezionando un angolo di 30° e di 60° rispetto alla direzione principale di propagazione del sito.

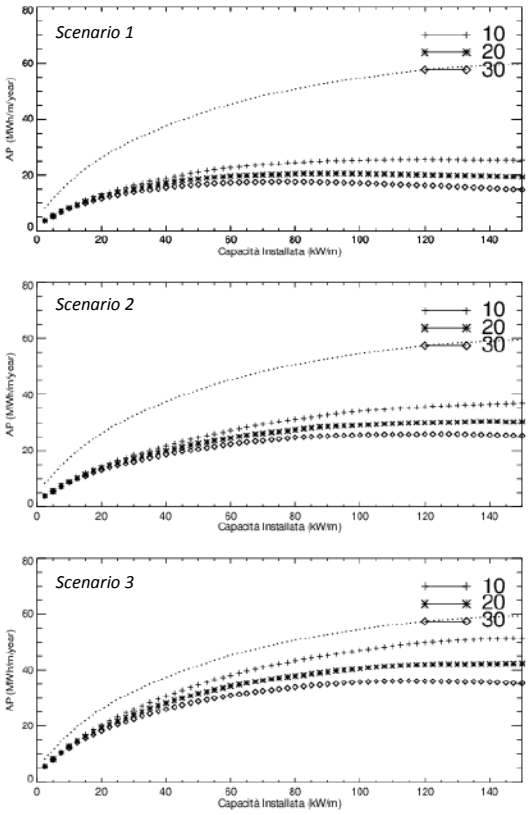


Figura 204. Produzione annua in funzione della capacità installata in un sito nella zona sud-ovest della Sardegna

Nella Figura 204 è mostrato il risultato dell'analisi nel sito posto nella zona sud-occidentale della Sardegna. In figura sono mostrate, per i tre diversi scenari, le curve relative ad un valore minimo di attivazione pari al 10, 20 e 30% della capacità nominale e corrispondente soglia superiore di funzionamento della stessa percentuale. Per riferimento è riportata la curva relativa alla soglia del 10% calcolata senza altre limitazioni.

Considerare solo valori all'interno di un angolo di 30° riduce la produttività quasi ad un terzo di quella ottenuta considerando solo la soglia del 10%, nel caso dei due siti sulla costa occidentale della Sardegna. Con le stesse condizioni, nel caso di Pantelleria, sito caratterizzato da una più evidente direzionalità dell'energia, si ottiene invece solo una riduzione del cinquanta per cento. La situazione opposta si verifica nel sito nel mar Ligure, dove sono presenti nello spettro direzionale due picchi con intensità relativa diversa nelle diverse stagioni; in questo caso la curva di produttività si abbassa significativamente ed il massimo si sposta in corrispondenza di valori di capacità installata dell'ordine di 10-15 kW/m.

Un'altra attività, svolta nel corso della presente annualità, ha riguardato la catena operativa di previsione del moto ondoso e dell'energia associata, messa a punto nel corso della precedente annualità. Tale catena operativa fornisce le previsioni per tutto il bacino Mediterraneo alla risoluzione di 1/32° e per 10 sottobacini ad 1/128°. L'operatività del sistema è stata garantita quotidianamente per tutto l'anno corrente, rendendo disponibili su web ENEA dell'unità di Modellistica Ambientale previsioni per la durata di cinque giorni.

b. Attività sperimentale su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC

In questo obiettivo sono state svolte due attività distinte, la prima focalizzata su una campagna di misure sperimentali di campo realizzate su un convertitore OWC in scala ridotta [rapporto RdS/PAR2013/175] e la seconda relativa alla progettazione, costruzione e installazione di un OWC prototipale in scala 1:8 a geometria variabile [rapporto RdS/PAR2013/176].

L'attività sperimentale di campo su un modello in scala ridotta di un dispositivo a colonna oscillante del tipo U-OWC (U-Oscillating Water Column) è stata eseguita presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. In mare è molto difficile trovare onde con dimensioni da vasca di laboratorio, che siano anche pure onde di vento. Di solito, onde di quelle dimensioni sono sovrapposizioni di onde di vento e onde di mare-lungo le quali conservano i periodi che avevano nell'area di generazione, ma hanno altezze evidentemente ridotte.

Pertanto per tali onde, la similitudine di Froude tra lo stato di mare cui è sottoposto il modello e lo stato di mare cui è sottoposto il prototipo (dimensioni reali) non è più rispettata. Le prove eseguite a Reggio Calabria con modelli di strutture OWC diverse hanno avuto successo grazie alle condizioni eccezionalmente favorevoli del sito. La prima fondamentale condizione è che frequentemente si formano degli stati di mare con dimensioni tipiche da grossa vasca di laboratorio (altezze significative H_s comprese tipicamente tra 0,2 e 0,6 m, periodi dominanti T_p compresi tra 1,8 e 2,8 s) i quali consistono di onde pure di vento. Inoltre, presso il NOEL è possibile registrare tempeste con altezze significative dell'ordine di 1 m circa.

Le prove condotte sono state eseguite su un prototipo di cassone REWEC3 in acciaio, che è alloggiato e opportunamente solidarizzato ad una diga in cemento armato della lunghezza di 16,10 m ubicata alla profondità di 2 m. Il cassone in acciaio ha una larghezza della camera di assorbimento e del condotto verticale, rispettivamente, di 1 e di 0,5 m. La larghezza longitudinale della camera attiva di 6,9 m. Uno schema del cassone è riportato in Figura 205, e alcune immagini della struttura sono riportate in Figura 206.

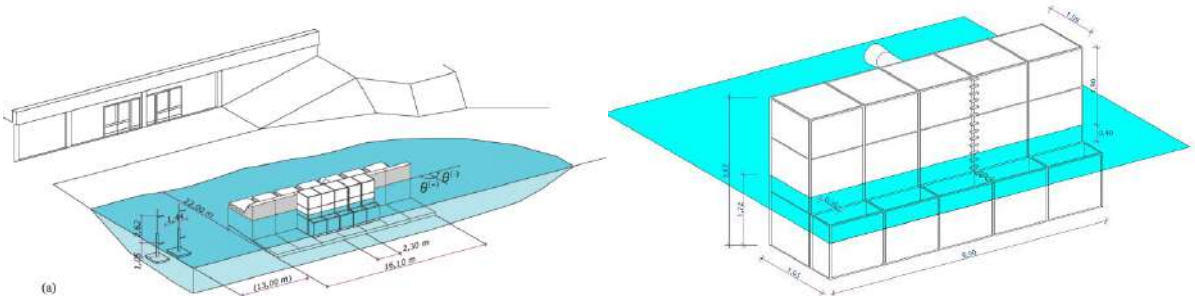


Figura 205. Schema del cassone REWEC3 in acciaio localizzato presso il laboratorio NOEL



Figura 206. Diga e cassone metallico REWEC3, con installata turbina di tipo Wells, esistente presso il NOEL

Sul cassone è stata installata una turbina di tipo Wells. Tutte le componenti del modello in scala ridotta dell'impianto, diga in cemento armato, cassone in acciaio REWEC3, turbina, sono state realizzate nell'ambito dei progetti: i) "Impianto U-OWC e turbina ad aria per la produzione di energia elettrica da onde di mare-POSEIDONE", finanziato dal Ministero dell'Ambiente (GU-SerieV n. 150 del 21/12/2009) ii) "Progetto dimostrativo su un modello di cassoni OWC o U-OWC" finanziato con decreto n. 13938 del 8/11/2011, POR FESR Calabria 2007/2013 Asse I.

Il modello è stato adeguatamente strumentato, sia all'interno della camera pneumatica che dell'imboccatura del condotto verticale. Le caratteristiche del campo di moto indisturbato sono state acquisite mediante una coppia di trasduttori di pressione e di ultrasuoni posti su pali ad una distanza di circa 13 m dalla diga.

Una prima fase sperimentale è stata condotta sul modello del sistema REWEC3, dalla fase di installazione (febbraio 2014) fino alla conclusione del progetto POSEIDONE, che è avvenuta nel maggio 2014.

I primi dati rilevati prima dell'installazione della turbina, con l'impianto attivo funzionante solo come assorbitore di energia ondosa, sono stati oggetto di elaborazioni congiunte ENEA-NOEL. Durante la fase di acquisizione dati e sulla base dei dati acquisiti, sono stati scelti alcuni record che potessero essere oggetto di successive analisi, caratterizzati da valori dei parametri dello stato di mare tipici di pure onde di vento. Sulla base dei dati di input e di output registrati da tali record, ENEA ha effettuato una validazione del modello di calcolo CFD implementato.

Una seconda fase di attività, ha riguardato l'elaborazione di dati acquisiti in data 01.09.2014, quando presso il NOEL è stata registrata una forte mareggiata con stati di mare aventi altezze prossime a 1 m. Durante tale fase, le acquisizioni sono avvenute a turbina di Wells funzionante ed è stato possibile raggiungere gli obiettivi per i quali era stato progettato l'impianto. Tra gli stati di mare misurati, il picco massimo di potenza prodotta dalla turbina è stato di 1,88 kW e il valore medio di potenza assorbita in uno stato di mare ha raggiunto il valore massimo di 533 W. Per il record caratterizzato dalle seguenti grandezze di campo di moto incidente: altezza significativa H_s=0,99 m, periodo di picco T_p = 4,0 s, parametro di larghezza dello spettro ψ^* =0,614, l'impianto è stato capace di assorbire circa 600 W (Figura 207). La potenza prodotta dalla turbina è stata, invece, in media pari a circa 300 W durante lo stato di mare, come si evince dalla Figura 207 b, l'andamento temporale delle fluttuazioni di pressione sull'imboccatura del cassone REWEC3 misurate dal trasduttore di pressione è mostrato in Figura 207°.

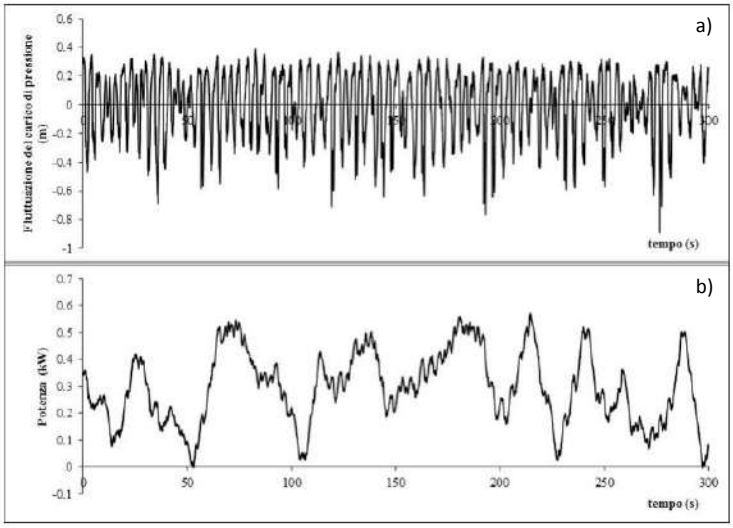


Figura 207. Registrazione della fluttuazione del carico di pressione nel REWEC3 e potenza della turbina installata durante la tempesta del 1 settembre 2014

I risultati ottenuti hanno dimostrato l'ottimo livello di efficienza dell'impianto sia in assenza che in presenza di turbina funzionante. Sono stati registrati stati di mare in cui la potenza prodotta dalla turbina ha registrato il picco di 1,5 kW, raggiungendo anche valori maggiori. Le analisi effettuate hanno avuto un duplice scopo. Quello di validare il comportamento del sistema REWEC3 per l'assorbimento dell'energia ondosa e la produzione di energia; e dall'altro quello di fungere da base per la validazione del modello CFD implementato da ENEA nonché di progettare un ulteriore fase sperimentale da effettuarsi su un cassone REWEC3, finanziato da ENEA, a geometria variabile per lo studio di una progettazione ottimizzata degli impianti U-OWC.

Le seconda attività svolta in questo obiettivo riguarda la progettazione, costruzione e installazione di un OWC prototipale in scala 1:8 a geometria variabile. Il lavoro eseguito si inquadra in una sequenza di attività svolte su un nuovo dispositivo denominato U-OWC che può essere integrato in dighe a parete verticale per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica. Tali dispositivi appartengono alla famiglia degli OWC, rispetto ai quali presentano un elevato grado di ottimizzazione capace di amplificare i rendimenti energetici. Rispetto ai tradizionali sistemi OWC di conversione di energia ondosa, gli U-OWC sono definiti da un tubo ad U (costituito dal

condotto verticale e dalla camera di assorbimento) nella parte anteriore della diga lato mare. Sebbene l'introduzione del condotto verticale lato mare non provoca una sostanziale modifica strutturale dell'U-OWC rispetto al tradizionale OWC, esso determina delle differenze sostanziali nell'idrodinamica che si instaura all'interno dell'impianto. In particolare, nei U-OWC le onde non entrano all'interno della struttura ma agiscono da forzante per instaurare il moto di compressione e decompressione della sacca d'aria all'interno dell'impianto. Questa fondamentale differenza ha delle notevoli conseguenze sulle prestazioni del dispositivo. Infatti, gli U-OWC hanno un periodo proprio maggiore di un analogo OWC. Conseguentemente, questo particolare tipo di impianto è in grado di assorbire una maggiore quantità di energia in presenza di stati di mare generati dal vento e di onde di mare lungo. Questo perché un U-OWC, grazie all'introduzione del condotto verticale, può essere progettato al fine di raggiungere la condizione di risonanza naturale per i livelli di agitazione ondosa incidente che convoglino la maggiore quantità di energia durante l'anno.

La progettazione degli impianti U-OWC ha già raggiunto un elevato grado di razionalizzazione. L'obiettivo successivo è quello dell'ottimizzazione. In tale contesto si inquadra l'attività svolta nell'ambito del presente progetto, finalizzata alla validazione sperimentale su modellistica di piccola scala in mare di impianti di tipo U-OWC da eseguire presso il laboratorio NOEL dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Presso il NOEL si eseguono sperimentazioni direttamente in mare, sulla meccanica delle onde e su modelli in scala ridotta di strutture marittime, operando con le classiche tecniche delle vasche di laboratorio. Le prove eseguite a Reggio Calabria con modelli di strutture diverse hanno avuto successo grazie alle condizioni eccezionalmente favorevoli del sito. La prima fondamentale condizione è che frequentemente si formano degli stati di mare con dimensioni tipiche da grossa vasca di laboratorio (altezze significative H_s comprese tipicamente tra 0,2 e 0,6 m, periodi dominanti T_p compresi tra 1,8 e 2,8 s) i quali consistono di onde pure di vento. Inoltre, presso il NOEL è possibile registrare tempeste con altezze significative dell'ordine di 1 m circa. Infine, un'altra importante peculiarità del NOEL è la possibilità di trovare in mare onde con altezze significative e spettri da pure onde di vento.

Nello specifico le attività sperimentali eseguite presso il NOEL avevano come finalità quella della validazione dei modelli teorici sviluppati e di verifica di campo del comportamento del sistema U-OWC sia come assorbitore di energia (in assenza di turbina funzionante) sia come sistema per la produzione di energia elettrica dalle onde di mare (in presenza di turbina funzionante) su un modello di sistema U-OWC.

Altre attività hanno riguardato la progettazione e realizzazione di un nuovo modello di impianto U-OWC in scala 1:8 a geometria modificabile da installare presso NOEL. La finalità è quella dello studio dell'idrodinamica ottimizzata dell'impianto, per incrementare i rendimenti di assorbimento del convertitore. A tal scopo, è importante, evidenziare che un impianto U-OWC può essere opportunamente dimensionato nelle sue parti attive, ovvero dimensioni geometriche del condotto e della camera di assorbimento, in fase di progetto per massimizzare i coefficienti di assorbimento del modo ondoso incidente. Al fine di potere analizzare diverse configurazioni di U-OWC, è stato, quindi, progettato un nuovo modello di U-OWC, che è caratterizzato da un'elevata modularità. Infatti, esso è dotato di 2 setti interni rimuovibili, che permettono di partizionare la camera in 3 celle indipendenti. Gli schemi del cassone U-OWC a geometria modificabile sono riportati in Figura 208.

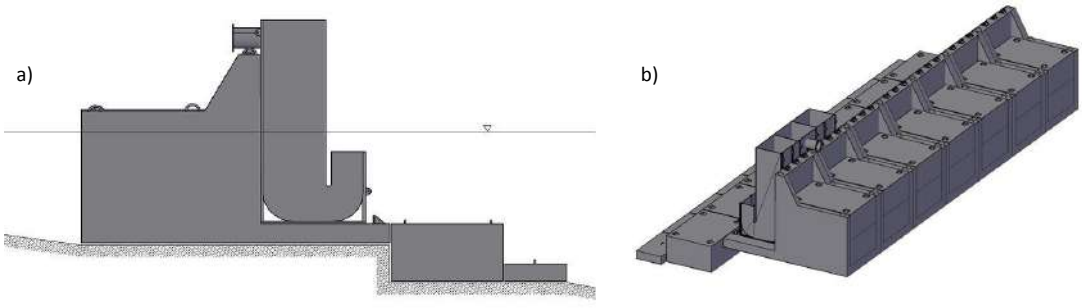


Figura 208. a) Sezione trasversale del cassone, inclusiva della struttura in cemento armato e del cassone REWEC3 in acciaio, b) Vista 3D della diga, con il cassone ENEA sulla sinistra



Figura 209. Posa in opera del cassone U-OWC a geometria variabile presso il NOEL

La peculiarità dell'impianto sperimentale è la sua modularità. Infatti, esso è dotato di 2 setti interni rimuovibili, che permettono di partizionare la camera in 3 celle indipendenti.

L'obiettivo finale del progetto è di identificare la configurazione ottimare del U-OWC analizzando configurazioni con differenti larghezze della camera. La sperimentazione da svolgere è articolata nelle seguenti fasi:

1. REWEC3 con 3 celle indipendenti;
2. REWEC3 con 2 celle indipendenti;
3. REWEC3 a cella singola.

La fase 1 prevede il monitoraggio di celle non comunicanti. Tale configurazione è quella con le celle più strette. La fase 2 è condotta rimuovendo uno dei 2 setti interni al cassone. Tale fase è intermedia, nel senso che sarà analizzata la configurazione con un'ampiezza della camera intermedia tra quelle sperimentabili. La fase 3 è effettuata rimuovendo tutti i setti. In queste condizioni l'impianto è a cella singola.

Il comune denominatore delle 3 fasi sperimentali è legato alla valutazione delle condizioni di lavoro ottimali (in termini di assorbimento) dell'impianto. Pertanto, nelle tre fasi si valuterà l'energia assorbita dall'impianto e la relativa energia incidente, il cui rapporto è il parametro principale per valutare l'efficienza del REWEC3.

In parallelo, si condurrà un'attività di interesse strettamente strutturale. In particolare, si condurrà una valutazione delle sollecitazioni agenti sui setti interni dell'impianto. Tale sollecitazione è valutata per mezzo delle misurazioni fornite dai trasduttori posti all'interno dell'impianto. Tali analisi non sono state oggetto di studi precedenti, pertanto è necessario, al fine di garantire la sicurezza strutturale del REWEC3, condurre ulteriori studi che sfruttino le possibilità offerte dal cassone attualmente presente presso il NOEL (Figura 209).

Gli elementi chiave del REWEC sono 3: condotto ad U, colonna d'acqua e camera d'aria. Ovviamente le parti meccaniche rivestono un ruolo primario nella ottimizzazione delle prestazioni energetiche del REWEC3. Tuttavia esse non sono analizzate in questo progetto e comunque rivestono un ruolo minore nell'analisi della idrodinamica dell'impianto.

Gli elementi principali del REWEC3 saranno monitorati attraverso un'adeguata strumentazione. Tale strumentazione è composta da trasduttori di pressione e sonde ultrasoniche, che hanno il compito di fornire misure istantanee della quota delle superfici libere e del carico di pressione in determinati punti. In particolare, si prevede di installare la seguente strumentazione: 3 ultrasuoni e 15 trasduttori di pressione.

Gli ultrasuoni saranno ubicati in cima alle camere di assorbimento. Essi permetteranno di monitorare costantemente la quote della superficie libera all'interno del cassone metallico in tre punti distinti. Tre gruppi di 3 trasduttori saranno localizzati all'interno delle colonne d'acqua al di sotto delle sonde ultrasoniche. Il loro compito è quello di fornire misurazioni del carico di pressione. Inoltre, essi permettono una misura indiretta della quota della superficie libera della colonna d'acqua oscillante. Tre trasduttori di pressione saranno installati nelle bocche esterne del cassone, lato mare. Tali strumenti permettono di valutare l'entità della forzante del sistema e quindi di condurre delle opportune analisi dinamiche. Inoltre, essi sono fondamentali per la valutazione della frazione di energia ondosa assorbita dal REWEC3. Tre ulteriori trasduttori di pressione saranno installati nella camera d'aria. A differenza di quelli impiegati nella colonna d'acqua, questi strumenti sono in grado di lavorare in condizione di depressione.

c. Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC

Le attività relative all'analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC sono state suddivise in due fasi distinte. La prima fase è stata dedicata alla messa a punto del modello di calcolo CFD sulla base della geometria definitiva dell'apparato U-OWC sperimentale utilizzato nell'obiettivo b, mentre la seconda fase è stata focalizzata sul confronto tra risultati numerici ottenuti e i risultati sperimentali derivati dalla campagna di misure condotte nell'obiettivo b. Di seguito si riassume il lavoro svolto nella prima fase, quella relativa all'ottimizzazione del modello CFD [rapporto RdS/PAR2013/173].

Il lavoro di ottimizzazione del modello CFD si è incentrato sui seguenti aspetti: numero di processori, passo temporale e condizioni al contorno.

Per le analisi fluidodinamiche si è utilizzato il codice di calcolo OpenFOAM - The open source CFD toolbox - versione 2.2.1. In particolare è stato utilizzato il solutore interFoam, specifico per flussi bifase isotermici caratterizzati da fluidi immiscibili ed incomprimibili che utilizza come modello bifase il VOF (volume of fluids). Visto il notevole peso computazionale, le simulazioni sono state fatte girare sulle macchine appartenenti al sistema di calcolo ad alte prestazioni del progetto CRESCO. Per le nuove simulazioni numeriche sono state prese in considerazione due nuove forzanti, sempre approssimate con andamento sinusoidale, corrispondenti a due tipologie di onde più realistiche per il sito nel quale è stato realizzato l'apparato sperimentale. Per prima cosa si è valutata l'influenza del numero di processori utilizzati per le simulazioni al fine di valutarne la saturazione computazionale. Utilizzando il modello iniziale, sono state eseguite cinque simulazioni con numero di processori crescente. Quindi è stata valutata la velocità di calcolo normalizzata rispetto al caso con numero di processori inferiore. Nella Figura 210 è riportato l'andamento delle velocità di calcolo normalizzate in funzione del numero di processori.

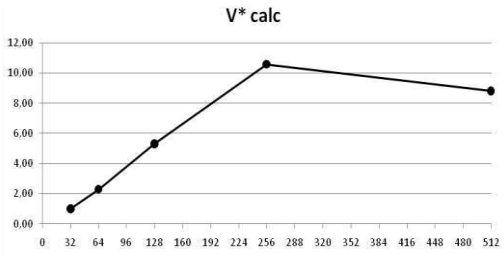


Figura 210. Andamento delle velocità di calcolo normalizzata in funzione del numero di processori

Come si vede il numero ottimale di processori per eseguire queste simulazioni CFD con il modello precedente è pari a 256. Si è analizzata quindi la possibilità di modificare la condizione sul Numero di Courant (Co) portando il valore massimo ammissibile da 0,5 a 1,0. La simulazione eseguita con questa nuova condizione, ha avuto un comportamento stabile andando a convergenza. Per concludere, una simulazione condotta utilizzando il modello iniziale con un numero di processori pari a 256 e Numero di Courant, Co, massimo ammesso pari a 1,0, ha una velocità di calcolo circa tre volte quella corrispondente ad una simulazione condotta con lo stesso modello ma con un numero di processori pari a 128 e Co massimo ammesso pari a 0,5. Il nuovo modello geometrico è stato quindi realizzato basandosi sulla geometria definitiva fornita dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Nella Figura 211 è riportato il nuovo modello geometrico utilizzato per le simulazioni.

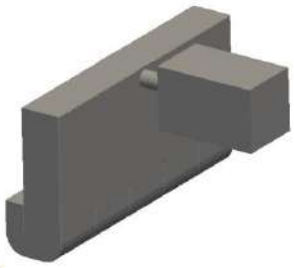


Figura 211. Nuovo modello geometrico

In questo nuovo modello, rispetto a quello realizzato la scorsa annualità, la condizione al contorno non è stata applicata alla sezione circolare di uscita dal tubo turbina, ma si è simulato un volume esterno, di forma parallelepipeda, all'uscita del tubo per meglio approssimare le condizioni reali di uscita/ingresso dell'aria. Le condizioni al contorno sono quindi state applicate alle superfici esterne di questo volume aggiuntivo.

Nell'applicazione delle condizioni iniziali ed al contorno per la pressione, anche in questo nuovo modello, si è assegnato al posto della pressione assoluta p la pressione decurtata della componente idrostatica p-rgh. Per la discretizzazione spaziale del nuovo modello valgono le stesse considerazioni fatte a suo tempo per la realizzazione del mesh del modello iniziale. In Figura 212 è mostrato un particolare del mesh nella zona di collegamento tra la camera ed il tubo turbina. Il mesh così realizzato è costituito da un totale di circa 5,1 milioni di celle.

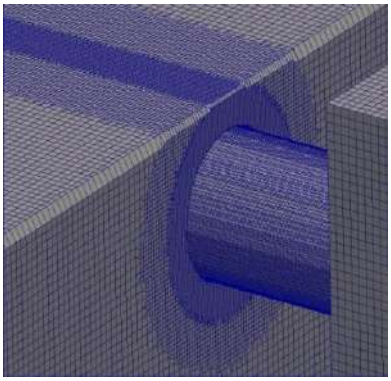


Figura 212. Mesh zona di collegamento camera-tubo turbina

Sono state effettuate quattro simulazioni considerando rispettivamente la prima forzante applicata ai due modelli (modello precedente e nuovo) e successivamente la seconda forzante applicata sempre ai due modelli. In

Figura 213 sono riportate due immagini del modello precedente con la prima forzante sinusoidale al termine della settima onda simulata (t = 19,25 s). In Figura 214 sono riportate le corrispondenti immagini per il nuovo modello sempre al tempo t = 19.25s

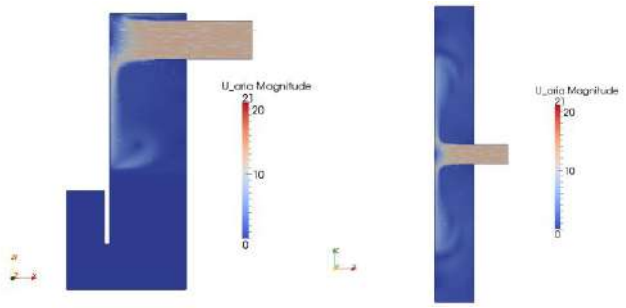


Figura 213. Andamento della velocità dell'aria al tempo t = 19.25 s - Modello iniziale - prima forzante

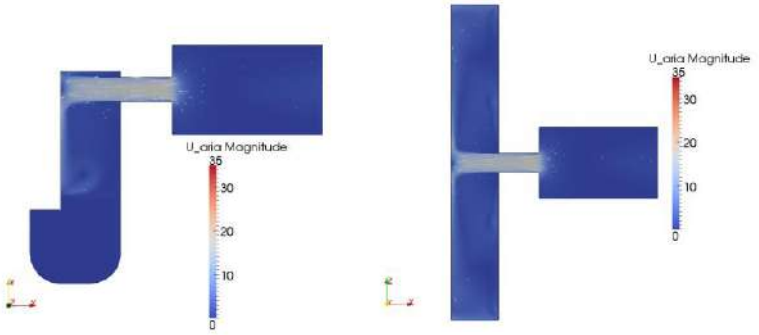


Figura 214. Andamento della velocità dell'aria al tempo t = 19.25 s - Nuovo modello - prima forzante

In Figura 215 e 216 sono riportati gli andamenti delle velocità nel caso della seconda forzante sinusoidale, sia per il modello precedente sia per il nuovo modello sempre al termine della settima onda simulata (t = 49.7 s).

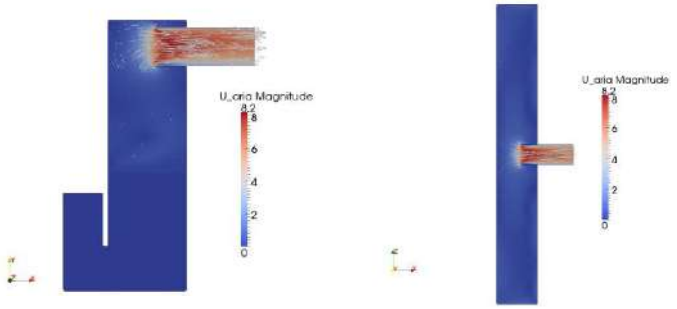


Figura 215. Andamento della velocità dell'aria al tempo t = 49.7 s - Modello precedente - seconda forzante

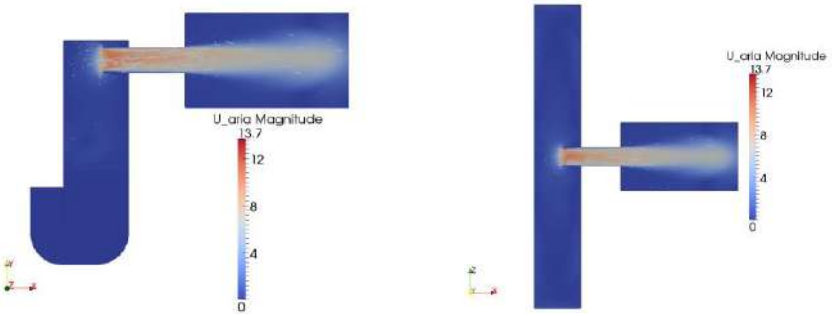


Figura 216. Andamento della velocità dell'aria al tempo t = 49.7 s - Nuovo modello - Seconda forzante

Di seguito si riassume il lavoro svolto nella seconda fase, che riguarda il confronto tra i risultati sperimentali forniti dall'Università di Reggio Calabria e quelli ottenuti dalla simulazione CFD del sistema, utilizzando il nuovo modello ottimizzato durante la prima fase [rapporto RdS/2013/174].

I dati sperimentali, forniti dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria, per il confronto con le simulazioni CFD, sono le registrazioni delle evoluzioni della pressione in due punti dell'apparato sperimentale, il primo (trasduttore di pressione 1) posizionato in corrispondenza della superficie di ingresso/uscita dell'acqua di mare, il secondo (trasduttore di pressione 2) posizionato in corrispondenza della copertura della camera interna, quindi nella zona occupata dall'aria. Nella Figura 217 è riportato il nuovo modello con l'indicazione della posizione dei due trasduttori di pressione.

L'andamento nel tempo della pressione sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua, trasduttore di pressione 1, è stato utilizzato per ottenere la forzante nella simulazione CFD.

Nel modello numerico la forzante è introdotta come evoluzione nel tempo della variabile p-rgh, quindi partendo dalla pressione p, ottenuta sperimentalmente, si è calcolato l'andamento nel tempo della variabile p-rgh:

$$p\text{-}rgh = P_{sperimentale} - (\rho_{H2O\ mare} \times g \times h)$$

con:

$\rho_{H2O\ mare}$: la densità dell'acqua di mare
g : l'accelerazione di gravità
h : la quota del trasduttore di pressione 1 rispetto alla base del modello.

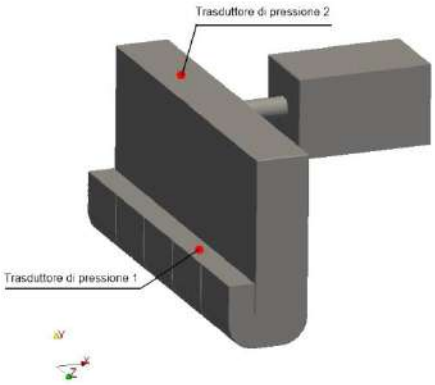


Figura 217. Nuovo modello con indicazione della posizione dei due trasduttori di pressione

Nel grafico di Figura 218 è riportato l'andamento di p, sulla superficie di ingresso/uscita dell'acqua e l'andamento di p-rgh così ottenuto.

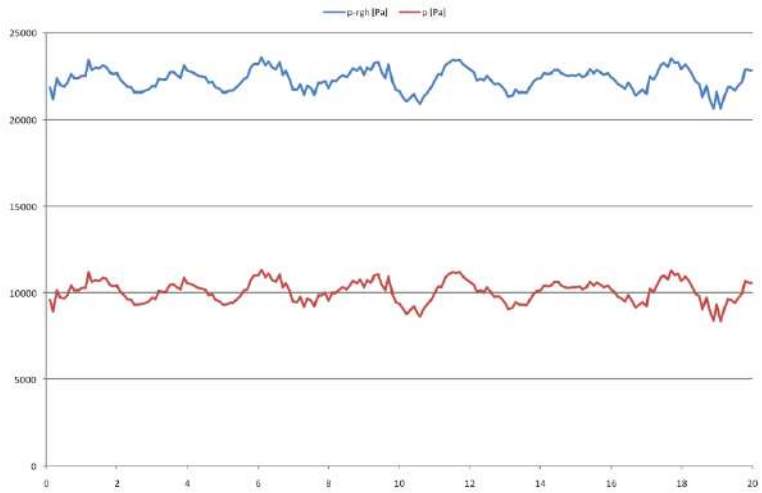


Figura 218 . Andamento di p e di p-rgh – Trasduttore di pressione 1

Nel grafico di Figura 219 è riportato l'andamento della pressione p, calcolata nella simulazione CFD, nel punto corrispondente alla posizione del trasduttore di pressione 2 (Figura 219).

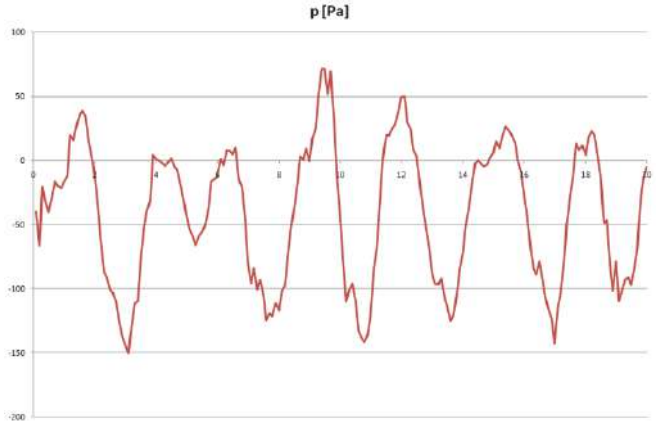


Figura 219. Andamento di p, calcolata numericamente, in corrispondenza della posizione del trasduttore di pressione 2

Nel grafico di Figura 220 è riportata sia la pressione p registrata sperimentalmente (blu), sia la pressione p calcolata numericamente (rosso) in corrispondenza del trasduttore di pressione 2. Nel grafico l'asse verticale di sinistra riporta i valori riferiti alla pressione calcolata, mentre l'asse verticale di destra riporta i valori riferiti alla pressione registrata sperimentalmente.

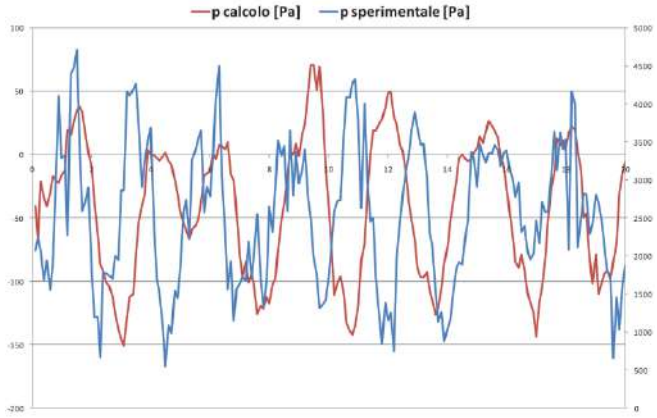


Figura 220. Andamento della pressione p numerica e sperimentale - Trasduttore di pressione 2

Nel grafico di Figura 221 sono riportati gli stessi andamenti del grafico di Figura 220, nell'intervallo temporale da 15 a 20 s.

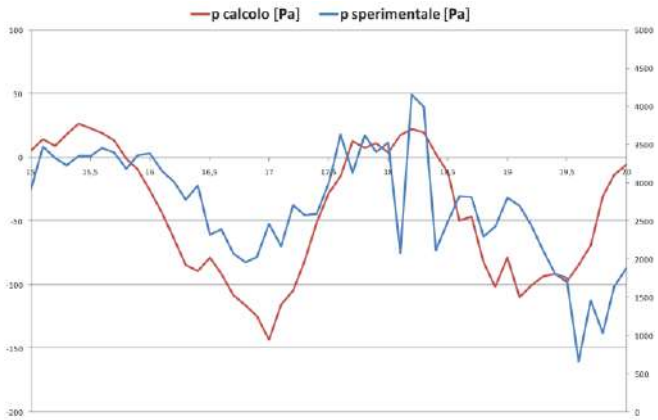


Figura 221. Andamento della pressione p, numerica e sperimentale, nell'intervallo di tempo da 15s a 20s - Trasduttore di pressione 2

Come si può vedere dalle Figura 220 e 221, dal punto di vista qualitativo, le due evoluzioni presentano un andamento che tende ad accordarsi verso la fine dell'intervallo temporale simulato, tale comportamento dimostra come il calcolo numerico necessiterebbe di un intervallo temporale di simulazione superiore per raggiungere la stabilità. Questo è dovuto al fatto che il sistema sperimentale ed il sistema numerico, pur partendo dallo stesso tempo iniziale, non partono dalle stesse condizioni iniziali: il modello parte da una condizione di quiete, mentre quello sperimentale da una condizione reale non nota.

Il confronto dei risultati mostra che, da un punto di vista quantitativo, i risultati calcolati e quelli sperimentali presentano delle forti discordanze dovute presumibilmente al fatto che il modello CFD non può tenere conto di fenomeni dinamici, che possono essere anche legati a variazioni atmosferiche, i quali influenzano invece le misurazioni sperimentali.

Dal punto di vista qualitativo i risultati del modello numerico e quelli sperimentali presentano un buon accordo verso la fine del periodo temporale simulato a dimostrazione della bontà del modello numerico sviluppato.

d. Studio delle prestazioni di un dispositivo di tipo point absorber "attivo" in scala reale, e progettazione di un sistema oscillante "passivo" per il recupero di energia dal moto ondoso

La prima attività svolta in questo obiettivo riguarda l'identificazione di metodologie per l'installazione di sistemi di conversione dell'energia da moto ondoso (WEC - Wave Energy Converter). I risultati relativi a questa prima attività sono riportati nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/169.

I WEC considerati sono i sistemi ISWEC e PEWEC (Figure 222):

1. ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter), sistema galleggiante "attivo" che tramite l'utilizzo dei fenomeni giroscopici permette la conversione del moto di beccheggio di un galleggiante in energia elettrica. Il sistema è "attivo" in quanto per il suo funzionamento richiede la presenza di un organo meccanico rotante (giroscopio). La regolazione della velocità del giroscopio permette l'adattamento del convertitore al clima ondoso incidente al fine di massimizzarne l'estrazione di potenza. Il sistema ISWEC è in fase di installazione presso l'Isola di Pantelleria con un impianto di taglia 100 kW (Figura 223);
2. PEWEC (PEndulum Wave Energy Converter), sistema galleggiante "passivo", composto da un pendolo incernierato allo scafo e libero di muoversi all'interno di esso. L'oscillazione dello scafo provocata dalle onde induce un'oscillazione del pendolo. Dato che l'oscillazione del pendolo ha una fase diversa da quella dello scafo, esiste moto relativo fra pendolo e scafo che può essere sfruttato per trascinare in movimento un generatore elettrico.

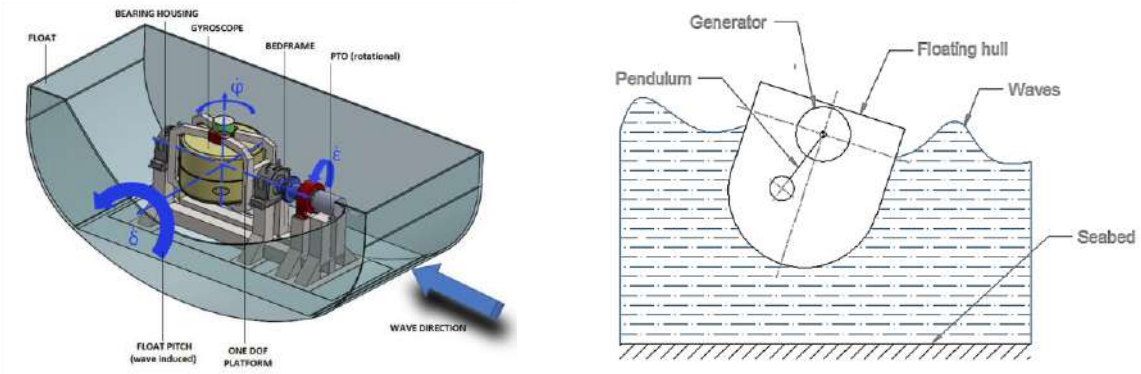


Figura 222. Gli schemi dei sistemi ISWEC e PEWEC

I sistemi ISWEC e PEWEC utilizzano i moti di oscillazione di uno scafo galleggiante per la produzione di energia elettrica. Data questa similitudine di funzionamento le caratteristiche degli ormeggi richiesti ai due convertitori sono simili fra di loro. In particolar modo i due sistemi per funzionare in maniera ottimale devono essere liberi di beccheggiare quando soggetti alle onde incidenti. Inoltre devono rimanere orientati rispetto alla direzione d'onda incidente per poter lavorare correttamente. Tali caratteristiche sono implementabili tramite un ancoraggio non lineare di prua e un ormeggio anti imbardata di poppa.



Figura 223. Realizzazione dello scafo del sistema ISWEC 100 kW

Di seguito si riportano i dettagli dell'ormeggio frontale di ISWEC 100 kW .

Ormeggio frontale (prua)

A partire dal fondo sono posate 4 ancore poste su di una circonferenza di raggio 50 m, a 90° l'una dall'altra. Le catene collegate alle ancore si incontrano in un punto di collegamento posto a 10 m dal fondo in modo tale da costituire un fondo virtuale che consenta la salvaguardia del fondale evitando lo strisciamento delle catene della linea di ormeggio sul fondo reale.

A partire dal fondo virtuale una linea di catena verticale porta al jumper. Il jumper è provvisto di una barra con due fori che consentono la connessione rispettivamente al precedente tratto di catena verticale e a quello successivo che porta alla zavorra. La coppia jumper-zavorra ha il compito di disperdere parte dell'energia di tiro dello scafo evitando sforzi impulsivi sulla catena e sui punti di connessione.

Il jumper fornito da è composto da tre sezioni cilindriche che in totale danno la spinta di galleggiamento desiderata da 13000 kg. Il jumper è provvisto di barra orizzontale che, oltre a consentire la connessione tra i diversi tratti di catena, garantisce la distanza tra questi ultimi, evitando grovigli, e consente la rotazione dello scafo intorno al jumper stesso.

Ormeggio di imbardata (poppa)

È un ormeggio posto a poppa del sistema che consente di mantenere ISWEC orientato con la direzione predominante d'onda. Si compone di un'ancora di massa pari a 3000 kg e di una cima che si connette alla parte posteriore del convertitore.



Figura 224. Alcuni componenti dell'ormeggio: ancore Hall, jumper e maniglioni di collegamento

I sistemi di installazione devono inoltre essere a ridotto impatto ambientale per poter salvaguardare la flora e la fauna marina. Il sistema di ormeggio di ISWEC 100 kW è progettato per avere il minimo impatto ambientale sull'ecosistema del luogo di installazione, in quanto:

1. l'uso di ancore in acciaio posizionate sul fondale marino permette di minimizzare l'impatto dell'ormeggio sul fondale in quanto non si necessita di infrastrutture permanenti e il sistema risulta rimovibile;
2. la presenza del fondo virtuale, sopraelevato rispetto al fondale marino, garantisce l'assenza di fasi di strisciamento sul fondale delle catene che compongono le linee di ormeggio. Il *jumper* infatti provvede a

mettere in tensione i rami di catena che lo collegano alle quattro ancore con l'effetto positivo di sollevarle dal fondale marino evitando possibili contatti/strisciamenti.

Sono state quindi svolte attività teoriche e di progettazione di base necessarie a definire le caratteristiche di un prototipo "point-absorber" per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica in cui il PTO ("power-take off") è di tipo passivo. Le attività svolte sono illustrate nei rapporti RdS/PAR2013/170, RdS/PAR2013/171 e RdS/PAR2013/172.

Sono stati presi in esame i fenomeni fisici che regolano il galleggiamento del natante, le sue interazioni con il moto ondoso e la trasmissione delle forze, con relativo trasferimento di energia, tra lo scafo e il sistema a massa oscillante contenuto al suo interno e dal sistema a massa oscillane al generatore elettrico a cui è connesso. La difficoltà maggiore riguarda la modellazione matematica delle interazioni tra onde e scafo, a causa della complessità dei fenomeni e alla forte non-linearità delle equazioni. Si seguono quindi due approcci tra loro complementari: da una parte si studiano i fenomeni idrodinamici con codici CFD specialistici di tipo commerciale, come ANSYS AQWA, e dall'altra si utilizzano modelli semplificati basati sull'analogia meccanica e integrati con parametri empirici o derivati dal primo tipo di modelli.

Queste attività teoriche hanno consentito di individuare i parametri fisici e geometrici rilevanti ai fini delle prestazioni energetiche del dispositivo e di stabilire i "gradi di libertà" del prototipo, intesi come caratteristiche da poter variate in modo semplice nelle diverse prove. In particolare risulta importante poter variare i seguenti elementi:

- Massa oscillante
- Lunghezza del braccio del pendolo
- Distanza orizzontale e verticale della cerniera del pendolo rispetto al baricentro dello scafo
- Massa dello scafo
- Baricentro del sistema.

Per ciascun elemento sono stati individuati gli intervalli di valori da esplorare; gli ultimi due (massa e baricentro del sistema) sono regolati con opportune collocazioni di zavorre.

Le valutazioni teoriche hanno consentito inoltre di stimare preliminarmente l'entità delle grandezze fisiche in gioco e di concepire il prototipo in modo da rendere misurabili tali grandezze a fronte di disturbi, deformazioni e fenomeni dissipativi. Ad esempio, per il prototipo in scala 1:45 è stata stimata una potenza attesa al generatore dell'ordine di 1 - 2 Wt e quindi l'architettura del sistema, i materiali e il tipo di componenti sono stati individuati in modo da contenere gli attriti ad un ordine di grandezza inferiore. Per lo stesso motivo risulta opportuno sospendere il gruppo pendolo-generatore su un unico cuscinetto, riducendo attriti e possibili disallineamenti.

La scala 1:45 deriva dalle dimensioni del canale disponibile per la sperimentazione presso i laboratori del Politecnico di Torino, con onde di circa 5 cm di altezza; l'obiettivo finale della ricerca è comunque lo sviluppo di dispositivi "full scale" in grado di generare potenze di picco dell'ordine dei 100 kW con il moto ondoso dei mari italiani.

Sulla base delle considerazioni esposte è stato poi elaborato il progetto di massima schematizzato in Figura 225.

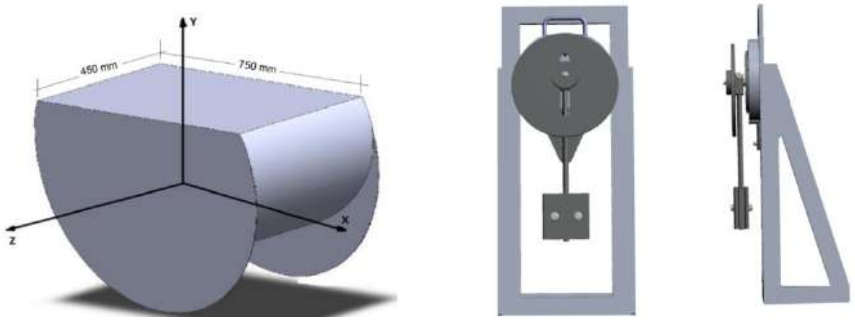


Figura 225. Schema del prototipo sperimentale

Inoltre, sulla base della geometria adottata e della descrizione fisico-matematica dei fenomeni è stato sviluppato dal Politecnico di Torino un modello di simulazione con cui analizzare i risultati delle sperimentazioni.

Parallelamente all'attività modellistica sono state condotte attività relative alla progettazione di dettaglio del prototipo, la sua fabbricazione nonché i controlli di accettazione e prove preliminari in vasca [rapporto

RdS/PAR2013/171]. La progettazione meccanica è stata eseguita dal Politecnico di Torino, in stretta collaborazione con l'ENEA, mentre la selezione dell'azienda esecutrice, l'affidamento dei lavori, i controlli in fase di lavorazione e di accettazione sono stati curati dall'ENEA. I controlli hanno riguardato:

- In fase preliminare, le attrezzature per le lavorazioni e l'origine dei materiali;
- alla consegna, l'ispezione visiva, la verifica delle principali dimensioni, l'assenza di interferenze e di attriti apprezzabili manualmente tra le parti in movimento e la tenuta idraulica dello scafo.

Il prototipo superati tutti i controlli ed è stato inviato al Politecnico di Torino per l'installazione nel canale di prova e l'esecuzione delle sperimentazioni. La Figura 226 mostra il prototipo al termine della lavorazione.



Figura 226. Prototipo sperimentale al termine della fabbricazione

Le attività di sperimentazione condotte con il prototipo presso i laboratori del Politecnico di Torino e l'elaborazione dei risultati ottenuti sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/172.

Il prototipo è stato collocato nel canale ed ancorato al fondo con un ormeggio che ne garantisce il posizionamento rispetto alla posizione longitudinale del canale e al tempo stesso lascia libero il grado di libertà di beccheggio necessario alla produzione di energia da moto ondoso (Figure 227).

Il canale di prova utilizzato è lungo 50,4 m e largo 60 cm con profondità dell'acqua variabile intorno ai 60 cm. Ad un'estremità del canale è posizionato un battitore che genera un treno di onde regolari con altezza e frequenza impostabili attraverso il sistema di controllo. L'onda del canale viene monitorata con sonde a ultrasuoni, mentre le grandezze del convertitore sono misurate con trasduttori dedicati: sensore inerziale per il moto dello scafo, cella di carico per la misura della coppia agente sul generatore e resolver per la misura di angolo e velocità di oscillazione del pendolo



Figura 227. Il setup sperimentale: prototipo posizionato nel canale di prova (vista laterale e dall'alto)

Nello specifico il sistema di acquisizione e controllo messo a punto dal Politecnico di Torino, basato su 3 computer e sulle schede elettroniche di controllo del PTO e del battitore, opera sulle seguenti grandezze principali:

- profilo dell'onda (altezza e frequenza)
- assetto dello scafo (angoli di beccheggio, rollio e imbardata)
- caratteristiche del PTO (coefficiente di smorzamento viscoso, coefficiente elastico)
- angolo di rotazione dell'asse del generatore
- momento torcente all'asse del generatore.

Le prove sono state svolte con la seguente procedura:

1. Avvio del sistema di acquisizione del moto dello scafo
2. Avvio del sistema di acquisizione del profilo d'onda
3. Avvio del sistema di controllo del PTO
4. Avvio del battitore e generazione dell'onda
5. Tempo di prova di 120 s
6. Spegnimento del battitore
7. Spegnimento del sistema di controllo del PTO
8. Spegnimento del sistema di acquisizione del profilo d'onda

9. Spegnimento del sistema di acquisizione del moto dello scafo
10. Attesa di circa 10 minuti per la stabilizzazione del canale.

I parametri di prova utilizzati e di configurazione del prototipo sono riportati nelle Tabelle 75 e 76.

Tabella 75. Onde di prova

Altezza d'onda picco-picco (m)	0,05
Periodo d'onda (s)	0,9 - 1,0 - 1,1 - 1,2 - 1,3 - 1,4

Tabella 76. Impostazioni del prototipo

Lunghezza pendolo	0,334 m
Massa oscillante	3 kg
Massa prototipo	75 kg
Coefficiente di smorzamento del PTO (c)	0,1 - 0,3 - 0,5 - 0,75 - 1,0 Nms/rad

In ciascuna prova sono stati registrati gli andamenti nel tempo, con risoluzione di 0,02 s, delle seguenti grandezze:

- rotazione relativa pendolo-scafo $\varepsilon(t)$
- velocità angolare relativa pendolo-scafo $\dot{\varepsilon}(t)$
- coppia agente sull'asse del generatore T_{PTO}
- potenza assorbita dal generatore P_{PTO}
- angolo di beccheggio scafo $\delta(t)$

I risultati ottenuti possono essere sintetizzati mediante il parametro RWC (Relative Capture Width), che esprime il rapporto tra la potenza uscente dal PTO e quella in ingresso al sistema, a sua volta ottenuta dalla densità di potenza dell'onda per la larghezza dello scafo, secondo la formula:

$$RCW = \frac{P_{PTO}}{P_w \cdot W}$$

I valori di RCW ottenuti nelle prove svolte sono riportati graficamente in Figura 228.

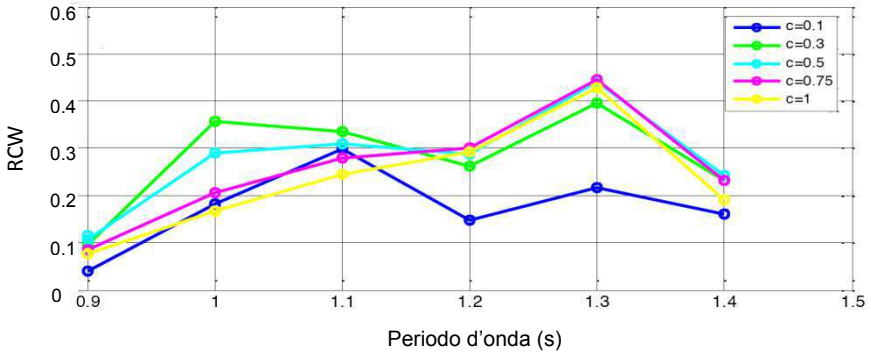


Figura 228. Sintesi dei risultati sperimentali del prototipo 1:45

Dall'analisi dei risultati si osserva che:

- la RCW si attesta a valori superiori al 30% per periodi d'onda superiori a 1 s, fino a raggiungere il massimo di 45,5% per periodo d'onda di 1,3 s. Questo dato testimonia le buone capacità di assorbimento del sistema, in grado di convertire in energia elettrica una quota rilevante di energia dell'onda;
- all'aumentare del coefficiente di smorzamento diminuiscono l'ampiezza e la velocità media di oscillazione ma aumenta la coppia sul PTO. Questo determina un equilibrio per il quale la potenza si massimizza per un determinato coefficiente di smorzamento, variabile per ogni periodo d'onda. Ogni onda ha quindi un coefficiente di smorzamento ottimale per massimizzare l'assorbimento di potenza.

Dal confronto tra i dati sperimentali e le simulazioni numeriche si evince che:

- il modello sovrastima i dati sperimentali dell'angolo di beccheggio e dell'angolo di rotazione relativa, specialmente in prossimità delle condizioni di risonanza del sistema (periodo d'onda 1,1 -1,3 s)
- si riscontrano alcuni errori significativi nel calcolo della potenza netta estratta.

Sulla base delle attività svolte e dei risultati sperimentali ottenuti si può quindi concludere che, anche se ci sono diversi aspetti che richiedono di essere maggiormente approfonditi, la tecnologia dei sistemi inerziali passivi risulta promettente dal punto di vista applicativo, con rendimenti oltre il 45% e potenze stimate "full scale" fino a circa 250 kW per unità. Inoltre le conoscenze teoriche e costruttive acquisite con le attività descritte consentono di affrontare con sicurezza lo studio e la realizzazione di prototipi di scala maggiore.

e. Comunicazione e diffusione dei risultati

Nel corso dell'annualità sono state intraprese diverse attività per la comunicazione e la diffusione dei risultati: organizzazione di un workshop, produzione di articoli scientifici, presentazioni a congressi e workshop e sviluppo di piattaforme WebGIS. A livello europeo sono state attivate sinergie attraverso la partecipazione al programma congiunto di ricerca sull'energia dal mare (*JP Marine Renewable Energy*) proposto dalla EERA *European Energy Research Alliance*. ENEA partecipa in maniera attiva al progetto congiunto attraverso il coordinamento delle Università e dei centri di ricerca nazionali.

Organizzazione Workshop

Il 1 e il 2 luglio 2014, nell'ambito dell'Accordo di Programma, l'ENEA ha organizzato il secondo workshop nazionale sull'energia dal mare. L'obiettivo del workshop è stato quello di promuovere lo sviluppo di questo settore delle energie rinnovabili attraverso la condivisione delle recenti esperienze nella realizzazione di dispositivi di conversione del potenziale energetico marino in energia elettrica. Il workshop aveva lo scopo inoltre di accelerare lo sviluppo del settore stimolando la collaborazione tra imprese e centri di ricerca[14]. Al workshop hanno partecipato tra gli altri: GSE, RSE, ENEL Green Power, Terna, CNR, Politecnico di Torino, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Università di Bologna, Università di Napoli, Politecnico di Milano, Università di Roma "Sapienza", WaveEnergy, 40South Energy Group, Wave4Energy e SEAPOWER.

A valle del workshop l'ENEA ha inoltre provveduto a realizzare una serie di video divulgativi sull'argomento.

Sviluppo piattaforme Web-GIS per la diffusione dei risultati

Nell'ambito del presente obiettivo è stata sviluppata una applicazione web di tipo GIS-based, denominata "Waves Energy" e raggiungibile all'indirizzo: http://utmea.enea.it/energiadalmare/. I dettagli relativi al portale web-GIS sono riporttati nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/168.

Essa è finalizzata alla rappresentazione dei dati e delle informazioni territoriali, alla loro condivisione con utenti esterni ed a fornire supporto alla pianificazione delle nuove installazioni, al sistema previsionale ed alla gestione delle infrastrutture esistenti. In sostanza, il sistema è in grado di integrare i dati di interesse, effettuare elaborazioni, supportare la gestione di informazioni previsionali, in modo da fornire quadri sintetici, chiari e affidabili ai propri fruitori (tra cui possono figurare anche decisori istituzionali e gestori di infrastrutture tecnologiche).

Le metodologie GIS sono universalmente riconosciute come di fondamentale supporto, non solo nella gestione dei dati territoriali e geografici, ma anche nelle fasi di studio ed analisi dei fenomeni ambientali e territoriali, ai fini della comprensione delle loro caratteristiche e dinamiche. In tal senso, un ruolo centrale è giocato dalle consolidate metodologie di elaborazione e di analisi spaziale, nonché dalla conseguente possibilità di rappresentare i risultati ottenuti attraverso specifiche mappe tematiche. Grazie allo sviluppo delle cosiddette applicazioni WebGIS, è possibile pubblicare e condividere dati geografici attraverso il Web. In particolare, utilizzando piattaforme fisiche e tecnologiche di tipo *open source*, è stata costruita un'architettura GIS/WebGIS, che si è concretizzata nella realizzazione di uno strumento di tipo *web-oriented*, per la pubblicazione, consultazione, analisi, ecc. di dati utili agli scopi progettuali.

[14] Le presentazioni del workshop sono disponibili all'indirizzo: http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2

Tra i vantaggi legati all'utilizzo della tecnologia WebGIS vi sono la condivisione globale di informazioni geografiche e dati geospaziali, la facilità d'uso da parte dell'utente (le applicazioni WebGIS sono utilizzabili attraverso i comuni browser internet) e la diffusione in rete e la capacità di raggiungere una platea più vasta di fruitori.

Il WebGIS "Waves Energy" è stato progettato ed implementato con l'obiettivo di archiviare e gestire dati geografici e territoriali relativi alle aree marine e costiere di interesse. I dati geospaziali di base e le mappe elaborate sono stati archiviati e gestiti in un *repository*, strutturato ad hoc. In tal modo, il WebGIS costituisce la naturale interfaccia geografica del sistema previsto: le informazioni territoriali di base e le mappe elaborate possono essere visualizzate ed interrogate via web, tramite un comune browser internet o tramite dispositivi mobili (e.g., tablet). Pertanto, i principali risultati prodotti nel corso delle attività progettuali sono stati resi fruibili in maniera open ed accessibili on-line.

Gli obiettivi specifici del WebGIS "Waves Energy" sono:

- delineare e caratterizzare il territorio marino e costiero oggetto di studio ed analisi;
- supportare l'analisi integrata delle aree di interesse, congiuntamente all'individuazione di specifici indicatori ambientali, per le fasi connesse alla progettazione di nuovi impianti;
- fornire supporto al sistema di previsione e monitoraggio;
- condividere dati, mappe e informazioni mediante il Web.

Tali funzionalità richiedono una gestione avanzata ed integrata di:

- dati geo-spaziali di base necessari alla caratterizzazione del territorio marino e costiero di interesse, nelle sue diverse componenti naturali ed infrastrutturali;
- dati geo-spaziali elaborati a supporto della gestione, della pianificazione, della previsione, etc..

In questo contesto, si è fatto ricorso a procedure ed algoritmi GIS di analisi spaziale (*geoprocessing*), finalizzati alla elaborazione geo-statistica ed alla visualizzazione spaziale per realizzare le funzionalità sopra citate. Quindi, per implementare adeguatamente il WebGIS in oggetto, è stata adottata una strategia basata su un'architettura *Client-Server* per l'interscambio dei dati geospaziali attraverso il Web, nel quale si è scelto di avvalersi di pacchetti software Free/Open Source (FOSS), conferendo al tutto caratteristiche di originalità e versatilità applicativa. L'architettura logica del WebGIS è riportata nella Figura 229 e si articola nella seguente catena operativa:

Repository Dati -> Web Server (GeoServer) -> Libreria (OpenLayers) -> Map Viewer (WebGIS)

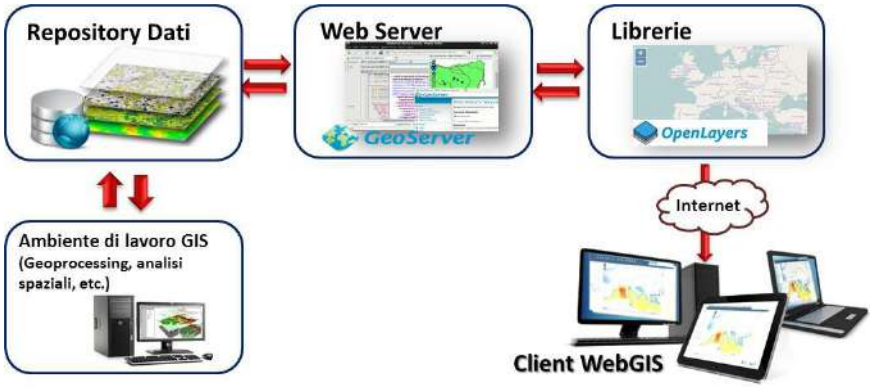


Figura 229. Schema architetturale dell'applicazione WebGIS "Waves Energy"

Il Repository Dati individua l'area di archiviazione che contiene l'insieme dei dati da utilizzare (in generale, in formato GIS) e che consentono l'accesso unicamente agli apparati definiti fisicamente a livello della Storage Area Network, in modo da garantire l'assoluta integrità e coerenza degli stessi.

Per Web Server si intende l'insieme degli apparati e dei relativi software che consentono al sistema di organizzare le informazioni e renderle fruibili alla rete. Nel caso in oggetto si è scelto di utilizzare GeoServer. Esso è un server *open source*, che svolge la funzione di nodo nell'infrastruttura SDI (*Spatial Data Infrastructure*) implementata e permette di condividere e gestire (secondo differenti privilegi di accesso) gli strati informativi archiviati nel proprio repository. Inoltre, supporta l'interoperabilità (legge e gestisce vati formati di dati raster e vettoriali). In considerazione di queste caratteristiche Geoserver è stato sfruttato per gestire i layers (mappe tematiche, strati informativi di base, etc.) archiviati nella banca dati geospaziale realizzata nel corso delle presenti attività e per la

loro successiva pubblicazione in rete secondo gli open standard previsti dall'Open Geospatial Consortium (OGC), quali - ad esempio - il Web Feature Service (WFS), il Web Coverage Service (WCS) e il Web Map Service (WMS)

OpenLayers è una libreria JavaScript di tipo Open Source con licenza derivata dalla licenza BSD per visualizzare mappe interattive nei browser web. OpenLayers offre una cosiddetta Application Programming Interface (API) per poter accedere a diverse fonti d'informazioni cartografiche in Internet come: WMS, WFS, mappe di tipo commerciale (Google Maps, Bing, Yahoo, etc.), diversi formati vettoriali, mappe del progetto OpenStreetMap, ecc.

Per quanto riguarda l'utilizzo del WebGIS, attraverso un normale browser web l'utente (non necessariamente dotato di specifiche conoscenze GIS) può visualizzare le mappe che rappresentano i risultati prodotti nell'ambito delle presenti attività progettuali. In particolare, per la visualizzazione dei dati di interesse, si è fatto ricorso allo standard WMS, per mezzo di un approccio di tipo *map-server* che consente di:

- produrre una mappa di dati georeferenziati;
- rispondere a query di base sul contenuto della mappa;
- rendere noto ad altri programmi che tipo di mappe può produrre.

I risultati ottenuti dalle simulazioni con i modelli numerici oceanografici (modello WAM su tutto il bacino del Mediterraneo) sono memorizzati sotto forma di file in formato NetCDF (Network Common Data Form). Tramite opportune elaborazioni, tali file NetCDF sono stati trasformati in un formato GIS compatibile (Esri shapefile .shp) e resi disponibili per le successive elaborazioni. I dati esposti dal WebGIS possono essere raggruppati, in base alle loro caratteristiche e specifiche, in tre distente tipologie:

a) Previsioni ("Forecasting")
b) Serie storiche ("Climatology")
c) Strati informativi di base ("Other Layers").

I primi, disponibili per tutto il Mediterraneo (con risoluzione spaziale circa 3 km, 1/32 di grado), forniscono la previsione a 5 giorni, ad intervalli orari, delle seguenti grandezze fisiche: Energia delle onde (*Wave Energy*); Altezza delle onde (*Wave Height*); Direzione delle onde (*Wave Direction*); Periodo (*Wave Period*). Inoltre, questi stessi dati sono disponibili e visualizzabili in maggior dettaglio per alcune sotto-aree di interesse.

I dati di cui al punto b), invece, sono ricavati da serie storiche e sono relativi al potenziale energetico da onde e contengono i valori medi di energia in kW/m nel periodo 2001-2010, suddivisi anche per periodi trimestrali. Tali layer tematici sono, ovviamente, raggruppati alla voce "Climatology" dell'applicazione WebGIS. In particolare nel WebGIS sono stati inseriti i seguenti dati per tutto il Mediterraneo e lungo le cose italiane per una fascia di 12 km.

Nella terza categoria, infine, sono raggruppati tutta una serie di dati geospaziali ed informazioni territoriali/ambientali di base, quali informazioni tematiche accessorie ed a complemento delle precedenti per un migliore inquadramento geografico e tematico: Batimetria del Mediterraneo (fonte: GEBCO); Subset della Batimetria compresa tra 0 e 200m; Fasce di distanza dalla costa: 0-25 km e 25-50 km (layer ricavati appositamente dai dati GEBCO); Porti principali; Aree Marine Protette Italiane (fonte: SINANET).

In Figura 230 è mostrata la schermata iniziale del WebGIS "Waves Energy". In particolare, nel layout della applicazione si possono individuare 3 sezioni principali:

A. La sezione "Layer" (lato sinistro): permette di selezionare il layer (mappa tematica) visualizzare;
B. La sezione centrale "Main Contents": è l'area in cui è possibile la visualizzazione del layer o dei tematismi selezionati, nonché la loro interrogazione (informazioni, grafici, etc.);
C. La sezione "Legend" (sul lato destro): viene visualizzata la legenda dei layer selezionati.

Sono disponibili varie funzionalità di base tipiche dei WebGIS, come zoom, pan, trasparenza, misure lineari ed areali, etc. Inoltre, cliccando su un punto qualsiasi del layer selezionato, vengono mostrate le informazioni o gli attributi quantitativi relativi al punto prescelto (*inquiry*). In particolare, nel caso dei layer tematici presenti nella Sezione "Forecasting", tali informazioni sono presentate sotto forma di grafico (un esempio in Figura 231). Infine, tramite una specifica finestra di dialogo è possibile visualizzare le mappe di "Forecasting" su base orario per i successivi 5 giorni di di previsione/simulazione.

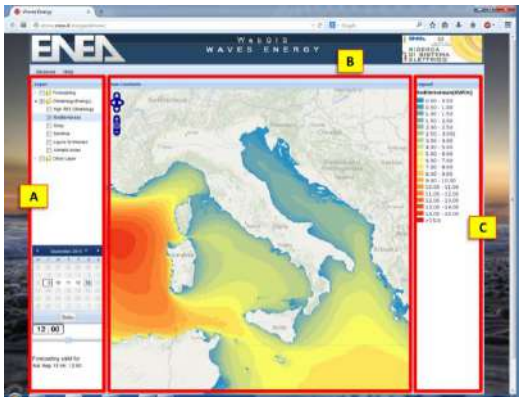


Figura 230. Interfaccia del WebGIS "Waves Energy"

In Figura 232 di visualizzazione e rappresentazione delle mappe tematiche prodotte con l'applicazione WebGIS sviluppata.

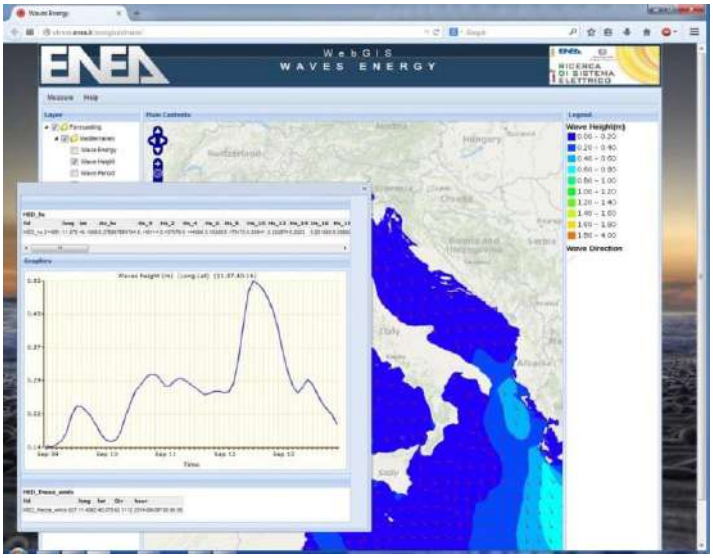


Figura 231. Forecasting: sovrapposizione GIS delle mappe tematiche relative all'altezza ed alla direzione delle onde, con relativo grafico orario giornaliero

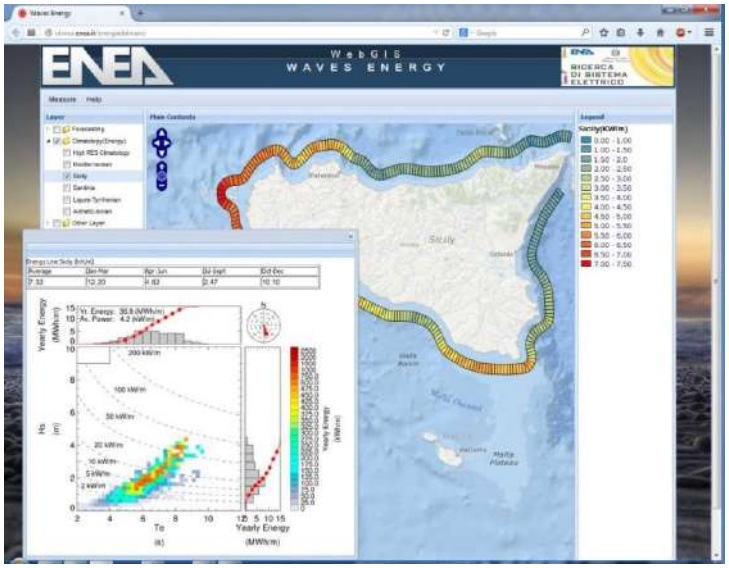


Figura 232. Tematismo dei valori medi di energia delle onde ricavata dai dati climatologici nel decennio di osservazione (2001-2010) e relativi grafici: dettaglio sulla Sicilia

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento Ingegneria Civile, Energia, Ambiente

Le attività dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, inserite nell'obiettivo b, hanno riguardato l'esecuzione di attività sperimentali di campo su un prototipo in scala ridotta di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante OWC (*Oscillating Water Column*) ottimizzato per la conversione dell'energia ondosa incidente e per la produzione di energia elettrica. Le prove sperimentali sono state eseguite presso il laboratorio NOEL (Natural Ocean Engineering Laboratory) dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, che è un centro avanzato di ingegneria marittima per la sperimentazione in mare, grazie ad alcune eccezionali peculiarità del mare di Reggio Calabria.

Le attività svolte dall'Università Mediterranea hanno riguardato inoltre lo studio e la progettazione di un prototipo di tipo U-OWC a geometria variabile. Successivamente, il prototipo realizzato da ENEA, è stato installato presso il laboratorio NOEL.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Le attività del Politecnico di Torino, inquadrate all'interno dell'obiettivo d, hanno riguardato l'identificazione di metodologie per l'installazione di sistemi di conversione dell'energia da moto ondoso (WEC, Wave Energy Converter) - in scala 1:1 - di tipo *point absorber.*

Le attività svolte dal Politecnico hanno inoltre riguardato la progettazione di un prototipo WEC in scala 1:45 del tipo *point-absorber* caratterizzato da un PTO (*power-take off*) di tipo passivo. Il prototipo realizzato è stato successivamente testato presso la vasca del Politecnico, che ha contribuito alla progettazione e realizzazione delle prove di laboratorio.

Cattura e sequestro della CO_2 prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

I combustibili fossili hanno rivestito finora un ruolo chiave nelle politiche energetiche dei vari Paesi per la produzione di energia elettrica. La situazione si avvia ad un sostanziale cambiamento nei prossimi anni e decenni per l'esigenza di abbattere drasticamente le emissioni di anidride carbonica per contenere e controllare le alterazioni climatiche: in Europa, dopo la strategia al 2020, la UE ha adottato nel 2011 una strategia al 2050, che prevede la riduzione di emissioni di gas serra da 80 a 90% rispetto al 1990.

La transizione verso una economia non più basata sul carbonio non sarà breve, e comunque impone di affrontare il tema di un impiego sostenibile dei fossili, che verranno ancora ampiamente utilizzati nei prossimi decenni. Per il conseguimento degli obiettivi climatici, sempre più condivisi a livello globale, la UE punta a una quasi totale decarbonizzazione dei processi di generazione elettrica, con il ricorso massiccio a efficienza energetica e fonti rinnovabili, e l'adozione di tecnologie di cattura e stoccaggio della CO_2 per gli impianti a fossili. La stessa Strategia Energetica Nazionale (SEN) include, fra le tecnologie prioritarie per il Paese, lo sviluppo delle tecnologie CCS (Carbon Capture and Storage).

L'obiettivo che ci si pone è quello di rendere utilizzabili industrialmente le CCS a partire dal 2030. Per questo occorrono non solo molta ricerca e sviluppo, ma anche impianti dimostrativi di scala significativa.

In questo quadro, il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato un accordo con la Regione Sardegna, per la realizzazione di un "*Polo tecnologico di ricerca sul carbone pulito e la costruzione di una centrale elettrica clean coal technology*" nell'area del Sulcis.

Nel settore della R&S 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. 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 CO_2.

Sul fronte nazionale, ma in linea con gli indirizzi europei, un'adeguata attività di R&S svolta dal sistema della ricerca pubblica e più in particolare dall'ENEA e da Sotacarbo prevalentemente presso il Polo Tecnologico del Sulcis, consentirà di contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni italiane di CO_2 e permetterà al sistema industriale nazionale di competere in campo internazionale 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, oltreché dall'incremento di efficienza, dalla contestuale separazione della CO_2 e il suo successivo stoccaggio o riutilizzo (tecnologie CCUS).

Le tecnologie più innovative, volte ad un'applicazione nel medio termine, sono concentrate sulla Piattaforma Sperimentale Sotacarbo, su importanti facility in corso di realizzazione, sempre presso Sotacarbo, relative alla cattura in ossi-combustione e alla tecnologia Coal to Liquid, e su due avanzate piattaforme sperimentali ENEA: 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 imperniati su una microturbina a gas da 100 kWe.

Le attività si articolano in una Parte A, di esclusiva pertinenza ENEA e di una *Parte B,* di esclusiva pertinenza del Polo Tecnologico del Sulcis, che si articola in due progettuali distinte:

- *Linea Progettuale B1*, a responsabilità SOTACARBO
- *Linea Progettuale B2*, a responsabilità ENEA.

Nel dettaglio il progetto è strutturato come segue:

Linea Progettuale A

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi
b. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione
c. Cicli a CO_2
d. Utilizzo della CO_2 per produzione di combustibili

Linea Progettuale B1

a. Cattura della CO_2 in post e pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi
b. Cattura della CO_2 in Ossi-Combustione
c. Monitoraggio e storage della CO_2
d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Linea Progettuale B2

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in Pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi e liquidi
b. Cattura della CO_2 in Ossi-Combustione
c. Sperimentazione di una rete fissa e mobile di monitoraggio geochimico nell'area del bacino Sulcis
d. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE A

Il *"panel"* di tecnologie proposte è caratterizzato da un diverso grado di maturità, pertanto nella Linea Progettuale A vengono affrontate soluzioni tecnologiche più avanzate e innovative, sia in termini di prestazioni energetiche che ambientali, puntando alla loro dimostrazione su scala di laboratorio o pilota, essendo infatti indirizzate a soluzioni nel medio-lungo periodo.

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi

L'obiettivo affronta due tecnologie innovative di trattamento in pre-combustione di combustibili solidi, relative a:

- qualificazione sperimentale di un innovativo ciclo di de-carbonatazione e clean-up del syngas (da zolfo e tar), basato sull'uso di sorbenti solidi ad alta temperatura (ciclo ZECOMIX ad alto rendimento);
- sviluppo di una tecnologia avanzata di pirolisi/gassificazione, per il trattamento di carboni di basso rango.

a.1 Sorbenti solidi avanzati per cattura della CO_2 ad alta temperatura

La separazione della CO_2 ad alta temperatura attraverso sorbenti a base di CaO (*calcium looping*) è tra le tecniche di separazione della CO_2 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 tale tecnica di assorbimento è applicabile oltre che alla separazione della CO_2 dal gas combustibile (assetto pre-combustione) anche ai fumi di combustione (assetto post-combustione).

Messa a punto del sorbente in laboratorio

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

CO_2 (cattura/rigenerazione).

Un importante filone di ricerca ha riguardato il processo di reforming del CH_4 con simultanea separazione della CO_2 (*Sorption Enhanced Reforming Process*, SERP). In particolare per minimizzare le resistenze alla diffusione durante la produzione di H_2 da metano è stato sintetizzato un materiale bi-funzionale per la separazione della CO_2 e contemporaneo reforming del CH_4. Il sorbente sintetico già sintetizzato[15] è stato impregnato da una soluzione di nichel [rapporto RdS/PAR2013/292] e portato ad una temperatura di circa 500 °C in aria. Il catalizzatore di nichel è stato supportato su $CaO\text{-}Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ (85:15) materiale sorbente per la CO_2 e per confronto su allumina commerciale. E' stato scelto il metodo di impregnazione come metodo di deposito del catalizzatore nichel. La soluzione di nichel è stata preparata sciogliendo la corretta quantità di $Ni(NO_3)_2.6H_2O$ in acqua deionizzata per ottenere un carico di Ni del 10% in peso. La soluzione del precursore di nichel è stato poi dispersa in un grammo di supporto e mescolato mediante agitazione magnetica per tutta la notte. La slurry è stata evaporata a 80 °C in un mantello riscaldante fino ad ottenere una pasta omogenea. Successivamente sono stati aggiunti 5 mL di 2-propanolo, agitato per 2 h ed essiccato a 100 °C. La pasta risultante è stata riscaldata a 500 °C in aria con velocità di riscaldamento di 20 °C min^{-1} per due ore e raffreddata a temperatura ambiente. Per la caratterizzazione è stata adottata la tecnica di diffrazione a raggi X, che ha permesso di individuare le fasi presenti nei singoli campioni e di stimarne la relativa percentuale.

Tale lavoro è stato corredato da lavori di modellazione [rapporto RdS/PAR2013/266] in cui si è utilizzato un modello a grani precedentemente sviluppato[16]. L'obiettivo è quello di studiare il comportamento di particelle bifunzionali diversamente strutturate e costituite da sorbente per la cattura di CO_2 e catalizzatore per il reforming degli idrocarburi nell'ambito dei processi SER per la produzione di idrogeno. L'idea alla base di questa opzione è di trarre vantaggio dall'accoppiamento in situ di più reazioni catalitiche (WGS e SER) con la reazione non catalitica di adsorbimento della CO_2 attraverso la carbonatazione di sorbenti a base di ossidi. Il vantaggio principale dovrebbe derivare dalla riduzione delle resistenze al trasferimento di materia. Per la cattura della CO_2 a caldo vengono utilizzati sorbenti particellari solidi porosi (sintetici o naturali) in reattori a letto fisso o più vantaggiosamente in quelli a letto fluidizzato.

Sono proseguite le attività sperimentali anche su sorbenti naturali portando all'individuazione di particolari trattamenti temici per migliorare la stabilità del materiale in esame [rapporto RdS/PAR2013/264]. Infine è stato portato avanti un modello di membrana perovskitica a trasporto ionico per l'apporto di ossigeno ad un gassificatore e la conseguente combustione di *char* in un letto fluidizzato [rapporto RdS/PAR2013/262]. Obiettivo dell'attività di ricerca è validare, mediante dati sperimentali, il modello per la descrizione del comportamento di elementi a membrane perovskitica a trasporto ionico per l'apporto di ossigeno ad un gassificatore e la conseguente combustione di *char* nel letto fluidizzato. Dopo un'attenta analisi di letteratura volta a fornire una ampia panoramica dell'oggetto di studio, si è proceduti ad esaminare test di permeazione sotto diverse condizioni operative al fine di valutare il flusso di permeazione attraverso le membrane tubolari di tipo BCFZ ($BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.2}O_{3-\delta}$). La trattazione riguarda, nello specifico, la valutazione dei test di permeazione in ambiente inerte su membrane di diversa taglia al fine di determinare il modello matematico che meglio rappresenta il flusso di ossigeno attraverso le membrane testate. A tal proposito per descrivere il comportamento degli elementi a membrana semi-permeabile in esame, un nuovo parametro cinetico è stato calcolato mediante un modello 1-D in MATLAB® e utilizzato nel modello di permeazione dell'ossigeno proposto in letteratura per le membrane tubolari.

Nell'ambito del Subtask è stata attivata una importante collaborazione con l'Università de L'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale, con particolare riferimento al tema della messa a punto del sorbente/catalizzatore attraverso studi di cinetica chimica e validazione dei modelli.

Sperimentazione del ciclo di assorbimento sulla piattaforma ZECOMIX

Il ciclo ZECOMIX realizza la contemporanea separazione della CO_2, con produzione di un syngas estremamente puro e ricco di idrogeno per il suo impiego ai fini della produzione di energia elettrica, o il suo eventuale accumulo. Nella presente annualità:

- sono state condotte nuove campagne sperimentali di gassificazione per verifica dei test precedenti, ottimizzando la produzione del syngas in vista della successiva decarbonizzazione;
- è stato predisposto l'impianto, in particolare la sezione di cattura, per testare un processo di separazione dell'anidride carbonica, con simultanea conversione del monossido di carbonio in CO_2 (reazione di CO shift), al fine di ottenere una corrente estremamente concentrata in idrogeno.

[15] S. Stendardo, L.K. Andersen, C. Herce, Chem Eng. J., 220 (2013) 383-394
[16] S. Stendardo, P.U. Foscolo, Chem. Eng. Science, 64 (2009) 2343-2352

- a livello impiantistico, sono previsti interventi di miglioramento della piattaforma, principalmente consistenti nella revisione del piatto distributore del carbonatatore e nel sistema di produzione e alimentazione acqua demineralizzata.
- è stato realizzato il collegamento della μTG T100 e curata la sua integrazione alla piattaforma sperimentale.

Il lavoro effettuato è stato focalizzato principalmente su attività a scala pilota per produzione di gas sintetico (syngas) da carbone e su attività propedeutiche alla produzione di idrogeno da reazione di water gas shift con separazione contemporanea della CO_2 con sorbenti solidi (SEWGS).

La prima parte ha consentito di valutare i principali risultati sperimentali per la produzione di syngas attraverso l'utilizzo del gassificatore a letto fluido presente nella piattaforma ZECOMIX.

Il letto fluido è costituito da particelle di olivina che agiscono da agente catalizzante del cracking del tar prodotto [rapporto RdS/PAR2013/261]. In Figura 233 è riportata la composizione del syngas in condizione stazionarie e in transitorio [rapporto RdS/PAR2013/260] con un rapporto di equivalenza di circa ER=0,59.

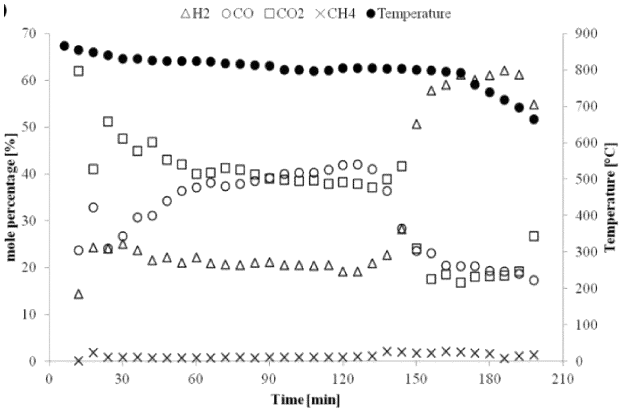


Figura 233. Composizione del syngas e temperatura di gassificazione con ER=0,59 e SC=0,80 in condizioni stazionarie

Quando il carbone è gassificato, il gas combustibile così prodotto viene campionato attraverso una sonda posta subito all'uscita del reattore. La sonda è corredata da materiale filtrante (lana di quarzo) per trattenere eventuali fini trascinati dal campione gassoso. Sia la sonda che tutte le linee di campionamento sono elettricamente riscaldate e mantenute ad una temperatura di circa 300 °C al fine di evitare condensazioni di idrocarburi pesanti in eventuali punti freddi che possano ostruire il normale flussaggio del campione. Il campione di gas così pulito da tar e polveri viene avviato e automaticamente iniettato e analizzato nel modulo gas-cromatografico corredato da analizzatore TCD e da due colonne cromatografiche disposte in serie: la colonna Molesieve 5A per la misura di gas permanenti (H_2, N_2, O_2, CO, and CH_4) e la colonna Hayesep Q per gli altri gas. Il GC è stato calibrato prima e dopo le prove sperimentali con l'ausilio di gas standard stoccati in bombole ad alta pressione. La composizione del campione di syngas è stata calcolata come rapporto delle aree dei picchi registrati durante la gassificazione e quelle raccolte durante la calibrazione del gascromatografo. Il gassificatore in esame, alimentato a carbone e fluidizzato attraverso una miscela di vapore ed ossigeno, viene riportato un modello matematico per l'interpretazione di questi dati e per uno studio parametrico volto a definire l'intervallo operativo ottimale per la conduzione del processo di gassificazione [rapporto RdS/PAR2013/265]. Il modello è stato formulato e implementato in ambiente MATLAB prendendo in considerazione condizioni di flusso a mescolamento perfetto e considerando la cinetica di gassificazione del coke e del reforming di idrocarburi leggeri. Tra i parametri presi in considerazione c'è il tempo medio di residenza delle particelle di carbone all'interno del letto fluido. Dato che il valore di questo parametro è caratteristico di ogni gassificatore, il modello proposto in questo lavoro può essere utilizzato per poter interpretare risultati sperimentali ottenuti da diversi gassificatore a letto fluido. I risultati numerici del modello sono stati confrontati con quelli sperimentali [rapporto RdS/PAR2013/260]. ottenendo una buona sovrapposizione sia per i dati di composizione che di temperatura. Lo studio dimostra l'importanza del rapporto di equivalenza (ER=O_2 alimentato/O_2 stechiometrico per la combustione) ed il rapporto vapore - carbone (SC) nella produzione del gas sintetico. La Figura 234 mostra un'analisi parametrica condotta con il modello sviluppato. Incrementando la portata di vapore e quindi aumentando il valore del parametro SC si vede come all'aumentare del vapore iniettato il CGE diminuisce da circa 0,575 a 0,490. Per la prova condotta secondo i parametri riportati nella didascalia della Figura 233 il CGE assume il valore 0,57. Il potere calorifico LHV diminuisce

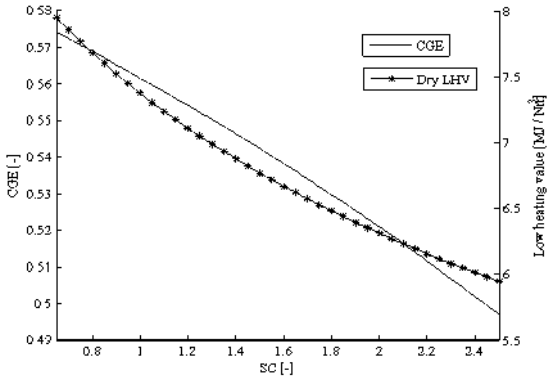


Figura 234. Efficienza di gas freddo (CGE) e potere calorifico (LHV) del syngas dry

invece da circa 8 MJ/Nm^3 fino a 5,94 MJ/Nm^3 passando per 7,7 MJ/Nm^3 per il syngas prodotto (ER=0,59). Questa analisi parametrica dimostra che il reattore di gassificazione della piattaforma ZECOMIX è stato esercito vicino alle condizioni ottimali. Ovviamente, cambiando la composizione del carbone le condizioni ottimali potrebbero cambiare.

La seconda parte delle attività invece è stata focalizzata sulle prove propedeutiche al test di SE-WGS (Sorption Enhanced Water Gas Shift). L'alta temperatura cui viene condotta la prova (600-650 °C) unita alla cattura della CO_2 gioca un ruolo fondamentale nella cinetica del processo: la prova può, infatti essere condotta in assenza di catalizzatori migliorando la gestione del processo SE-WGS. Vista la complessità della prova SE-WGS che prevede la reazione di WGS e la simultanea separazione della CO_2, è stata eseguita in via preliminare una prova di separazione della CO_2. In particolare è stata condotta una prova da una miscela gassosa (CO_2/N_2) la cui composizione (30/70 %v/v) si avvicina a quella di un gas sottoposto ad una reazione di WGS [rapporto RdS/PAR2013/292]. E' stato utilizzato un letto sorbente di circa 300 kg composto da dolomite granulare (diametro medio 550 μm) alimentata a circa 20 kg/h. In Figura 235 è riportata la curva di breakthrough del reattore di separazione CO_2.

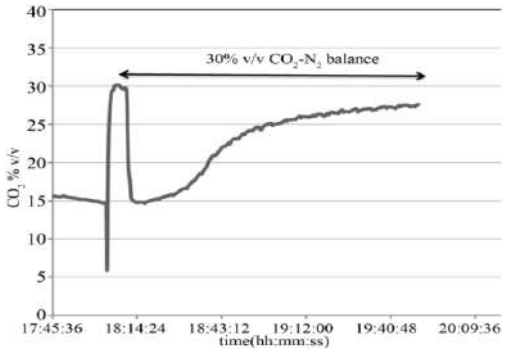


Figura 235. Curva di breakthrough del reattore di separazione della CO_2

A valle di questi test sperimentali delle attività di modellazione il test di WGS con simultanea cattura della CO_2 attraverso sorbenti solidi è stato programmato facendo uso di una portata di CO e H_2O pari rispettivamente a 40 e 55 kg/h. Questo consente di avere una portata volumetrica ad una temperatura di 650 °C di circa 345 m^3/h che garantisce una velocità di fluidizzazione circa due volte quella minima (è stata considerata la densità della dolomite calcinata, anche se in realtà questa cambia fino a portarsi a poco più di 2000 kg/m^3). Maggiori dettagli sono pubblicati nel rapporto RdS/PAR2013/268.

Le attività sulla piattaforma sperimentale ZECOMIX è stata completata con l'interfacciamento della microturbina T100 con il sistema di controllo dell'intera piattaforma sperimentale. Per l'Impianto ZECOMIX è previsto l'allaccio alla rete elettrica del generatore Turbec T100 tramite dispositivi di manovra protezione e controllo, montati su quadro elettrico opportunamente dimensionato; la macchina arriva a produrre circa 100 kW di potenza elettrica ad una tensione di 380 V. L'allaccio del generatore deve essere eseguito rispettando La Norma CEI 0-21 e aggiornamenti, che è stata elaborata di concerto con l'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) ed esplicita le regole tecniche di connessione alle reti di distribuzione di energia elettrica in bassa tensione (BT) su tutto il territorio nazionale. La turbina durante la fase di avviamento deve essere alimentata in quanto assorbe circa 10 kW elettrici (motore di lancio pompe di lubrificazione, raffreddamento); una volta raggiunti dal generatore valori di frequenza e tensione ideali, tramite lo stesso cavo, comincia a trasmettere energia elettrica sia verso l'impianto ZECOMIX che verso la stessa rete Enea fino ad un massimo di circa 100 kW elettrici. E' stato inoltre avviato un test di comunicazione con il sistema di controllo della Turbina tramite interfaccia seriale predisponendo una nuova interfaccia a DCS nella sala controllo di ZECOMIX ed implementando un datalogger.

Anche su questo fronte è operativa la citata collaborazione con l'Università de L'Aquila sul tema del follow-up sperimentale della piattaforma pilota ZECOMIX e l'ottimizzazione delle procedure di start-up".

a.2 Ciclo pirolisi e gassificazione

Una possibile via per lo sfruttamento di carboni di basso rango è quella di realizzare un processo di pirolisi del combustibile separata dalla fase di gassificazione di un char residuo di qualità, prodotto dalla pirolisi.

La piattaforma ENEA, denominata VAL.CH.I.RI.A (VALorizzazione CHar, Impianto RIcerche Avanzate, Figura 236), nasce come facility sperimentale per lo studio di tale ciclo integrato. Il processo consiste in una prima fase di produzione del syngas basato su devolatilizzazione/pirolisi del carbone, abbattimento del tar (mediante craking termico e catalitico) e dello zolfo. Ciò determina la produzione di un char di qualità per la successiva gassificazione.



Figura 236. Impianto VALCHIRIA, lato raffreddamento fumi

La versatilità dell'impianto permette l'utilizzo dello stesso anche per lo studio del comportamento di combustibili non convenzionali come biomasse, miscele carbone/biomasse ed altre. E' inoltre possibile utilizzare i vari componenti in modo separato o in modo integrato, come riportato nelle seguenti modalità:

- alimentazione - pirolisi - torcia,
- alimentazione - gassificazione - torcia,
- alimentazione - pirolisi - gassificazione - torcia,
- cattura CO_2 - torcia,
- alimentazione - gassificazione - cattura CO_2 - torcia.

La pressione di esercizio è prossima a quella atmosferica per facilitare l'esecuzione delle prove e la realizzazione strutturale della componentistica.

A valle della campagna di caratterizzazione sono state eseguite le prime prove di pirolisi allo scopo di collaudare la funzionalità delle apparecchiature nel corso delle fasi operative, interessando per il momento esclusivamente la parte riguardante il processo di pirolisi (Figura 237). Esse hanno avuto i seguenti obiettivi specifici:

- verificare la produzione di metano utilizzando carbone di qualità antracitico (prova A),
- confrontare i risultati delle prove di laboratorio utilizzando carbone di basso rango sub-bituminoso (prova B).

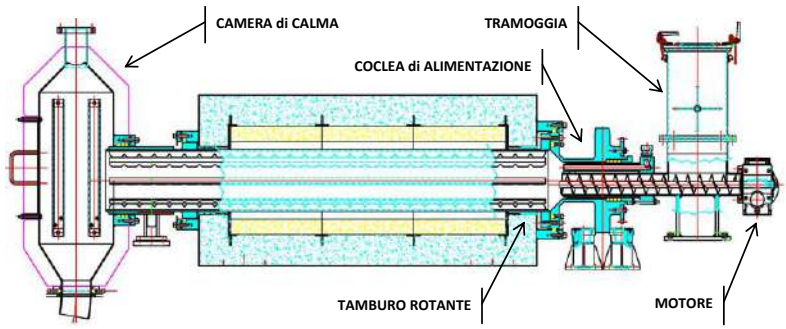


Figura 237. Impianto VALCHIRIA – tamburo rotante pirolizzatore.

Le prove sono state eseguite monitorando gli effluenti gassosi in uscita attraverso la linea di campionamento, utilizzando analisi gascromatografica e in parallelo analisi a infrarossi (IR).

L'attività di caratterizzazione e le prove di pirolisi effettuate sull'impianto VALCHIRIA hanno confermato due aspetti particolari:

- versatilità del reattore di pirolisi a tamburo rotante;
- corrispondenza dei dati sperimentali con dati analitici.

Per quanto riguarda il primo punto sono stati riscontrati:

- possibilità di alimentare il reattore con diverse tipologie di materiali: carbone, miscele carbone-olivina, dolomite, ossido di calcio;
- possibilità di effettuare trattamenti termici sia a bassa che ad alta temperatura (circa 1000 °C);
- possibilità di modulare l'intervento delle fasce scaldanti allo scopo di ottimizzare ed uniformare la temperatura all'interno del reattore;
- possibilità di avere tempi di residenza dai pochi secondi fino a decine di minuti;
- rispetto al tempo di residenza, la conferma dei dati analitici ottenuti dalla letteratura.

Per quanto riguarda il secondo punto, le prime due prove sperimentali effettuate sull'impianto hanno confermato la corrispondenza con quanto rilevato nel corso di altre attività sperimentali. In particolare:

- la prova A di pirolisi con carbone antracitico ha confermato la presenza costante di metano riscontrata nella campagna sperimentale di gassificazione di carbone eseguita nei mesi precedenti presso la Stazione sperimentale ZECOMIX. In particolare è stato verificato il basso tenore di CH_4 liberato durante la pirolisi del materiale carbonioso (sotto 1,5 %v/v). Questo conferma quanto riportato in letteratura: il metano misurato durante il processo di gassificazione effettuato sul gassificatore di ZECOMIX viene prevalentemente prodotto durante la pirolisi del carbone (Figura 238).
- La prova B di pirolisi con carbone del Sulcis, tipicamente sub-bituminoso di basso rango, ha confermato i dati analitici riscontrati in attività di laboratorio; nello specifico, la presenza di idrocarburi condensabili e di zolfo (Figura 238).

L'impianto è anche disponibile per consentire l'approfondimento delle tematiche scientifiche affrontate sulla piattaforma ZECOMIX, in particolare per quanto riguarda i processi di gassificazione e carbonatazione, con utilizzo di diverse tipologie di carbone, sorbenti solidi e di reagenti e/o catalizzatori.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/296.

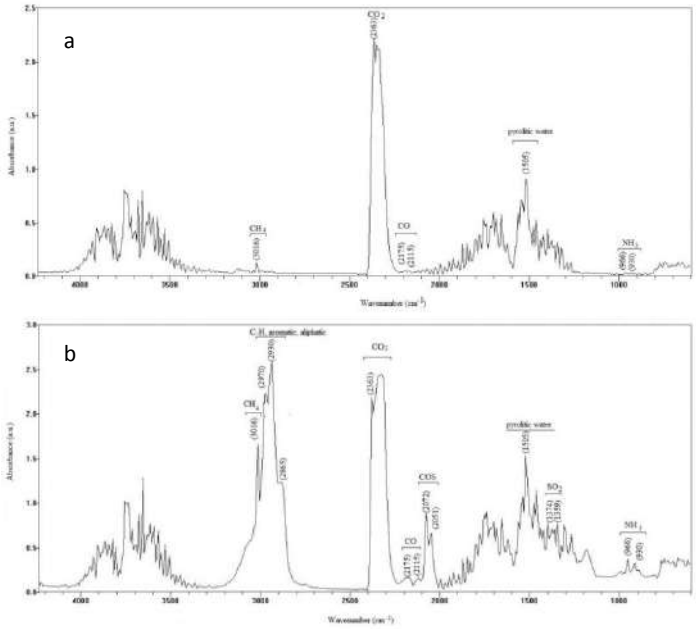


Figura 238. Prove di pirolisi, analisi IR: prova A (a), prova B (b)

b. Tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di combustione

Con riferimento alla cattura in pre-combustione e in ossi-combustione, è opportuno sottolineare come un ruolo determinate sia giocato dall'ottimizzazione del processo di combustione.

I seguenti Task affrontano da un lato lo sviluppo di un potente strumento di calcolo per la progettazione/ valutazione di componenti, dall'altro interventi concreti atti a ampliare il range di combustibili compatibili con i sistemi turbogas attuali, azione che va sotto il nome di "fuel flexibility", e al contempo ampliare il range operativo dei sistemi in relazione alle variazioni anche ingenti del carico, intervento che va abitualmente sotto il nome di

“load flexibility”.

b.1 Metodologie numeriche avanzate per la simulazione dei processi di combustione e la progettazione di componenti

Il proposito di operare perché risultino disponibili strumenti di calcolo avanzato, in grado di affrontare la modellazione e simulazione di processi reattivi complessi, rappresenta una sfida ambiziosa, a cui ENEA da diversi anni, in collaborazione con alcuni partner universitari nell’ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, sta lavorando con risultati oggi molto incoraggianti.

Strumenti numerici affidabili risultano elementi insostituibili e decisivi per la progettazione e per l’interpretazione di fenomenologie quali la combustione premiscelata, distribuita o MILD, di tipo omogenea o eterogenea, in geometrie complesse legate ai sistemi reali, e con la necessità di cogliere compiutamente la dinamicità dei fenomeni legata anche ad aspetti di cinetica chimica delle reazioni. Mediante tali strumenti è possibile ridurre drasticamente il numero di sperimentazioni a supporto della fase di progettazione e quindi i costi relativi. Essi inoltre vengono a costituire uno strumento formidabile per valutare gli effetti di modifiche, upgrade, e qualunque tipo di variazione venga introdotta in processi già consolidati.

Validazione di un modello di sottogriglia LTSM

Il Subtask ha per oggetto la validazione di un modello di sottogriglia LTSM (Localized Turbulent Scale Model) per Large Eddy Simulation (LES), implementato nel codice HeaRT di ENEA.

Nella precedente annualità è stato sviluppato un nuovo modello di sottogriglia per Large Eddy Simulation per trattare l'interazione turbolenza/combustione in fiamme premiscelate. Questo modello ha l'ambizione di cogliere a livello locale (nello spazio) i diversi regimi di combustione stimando la frazione di volume reagente all'interno di ogni singola cella di calcolo in funzione del valore assunto da numeri caratteristici rappresentativi della fisica in gioco, come i numeri di Reynolds, Prandtl e quello di Damkhoeler. 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. Sono anche considerati gli effetti di diffusione preferenziale delle specie combustibili più leggere, come l'idrogeno, sulla 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. Il nuovo modello è stato validato, nel corso di questa annualità, mediante un caso test preventivamente definito e simulato dagli stessi autori con tecnica Direct Numerical Simulation (DNS). Negli ultimi anni, grazie all'avvento di computer ad alte prestazioni e avanzati algoritmi numerici, la simulazione numerica diretta della combustione è emersa come un valido strumento di ricerca insieme alla sperimentazione.

Il caso consiste in una fiamma premiscelata metano/idrogeno/aria relativa ad un bruciatore con tre iniettori a sezione rettangolare affiancati. La miscela fresca reagente (con 20% in volume di contenuto di idrogeno) esce dall'iniettore centrale, mentre dai due restanti iniettori esce a velocità ridotta una miscela costituita dai gas prodotti dalla combustione della miscela centrale. Per comprendere l'influenza della turbolenza sulla struttura della fiamma, in questo lavoro si è effettuata una DNS tridimensionale di una fiamma premiscelata magra CH_4/H_2-Aria. Si tratta di una fiamma premiscelata (configurazione “slot burner”) di metano, idrogeno (80/20% in volume) ed aria, con un rapporto di equivalenza 0,7. Il regime di fiamma premiscelata è quello del "Thin Reaction Zone". Si è utilizzato uno schema cinetico dettagliato per la chimica del metano-aria costituito da 22 specie e 73 reazioni elementari. Inoltre per la discretizzazione spaziale delle equazioni è stata adottato uno schema al sesto ordine compatto sviluppato in ENEA per flussi comprimibili e griglie staggerate. Sono state calcolate in fase di post processing le velocità di spostamento del fronte di fiamma (individuato da isosuperfici di variabile di progresso) in funzione delle curvature e dello strain-rate e le probability density function (PDF) di queste grandezze.

Nello studio delle caratteristiche della fiamma sono state prese in considerazione le diverse diffusività delle diverse specie chimiche costituenti la miscela. E' stata sviluppata una nuova formulazione delle velocità di spostamento delle isosuperfici della variabile di progresso che tiene in conto delle diverse diffusività delle specie chimiche.

I risultati della DNS sono stati analizzati con dettaglio e costituiranno un importante database nel panorama internazionale. I risultati della simulazione DNS sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/270.

La simulazione LES con il modello LTSM sviluppata è stata confrontata con i risultati di riferimento offerti dalla DNS in termini di grandezze medie e fluttuazioni rms. Si riportano, in Figura 239, alcuni confronti significativi ed un

campo istantaneo di temperatura (Figura 240) rappresentativo della topologia della fiamma.

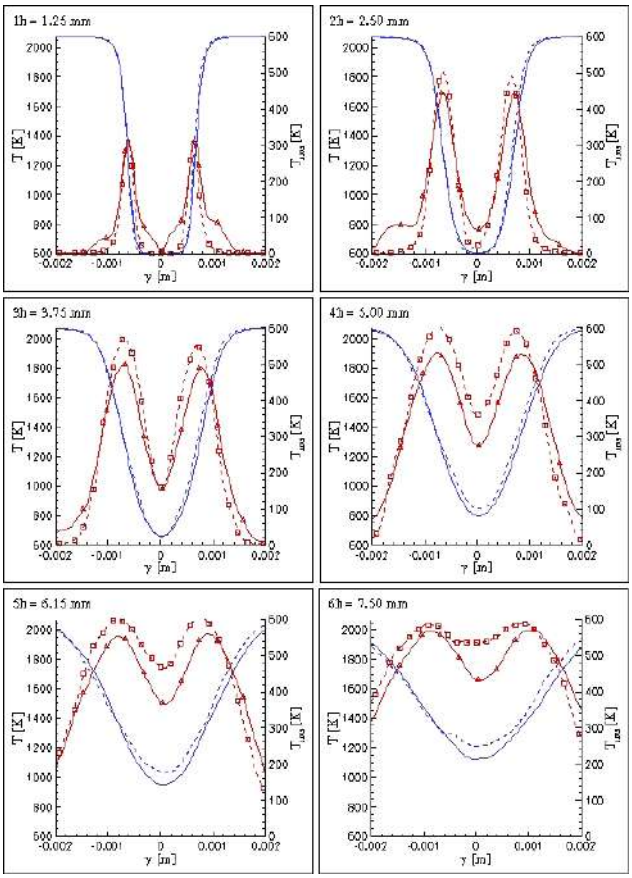


Figura 239. Confronti tra profili di temperatura media (blu) e rms (rosso). La curva a tratteggio si riferisce a simulazioni DNS, quella continua a simulazioni LES

L'accordo tra simulazione LES e simulazione DNS appare molto buono, e conforta sulla validità del modello sviluppato. I risultati sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/255.

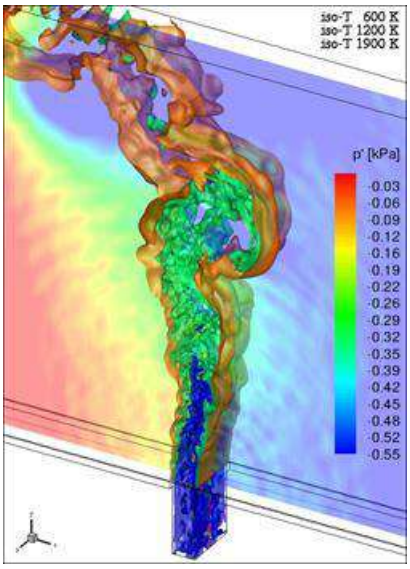


Figura 240.Campo istantaneo di temperatura con sovraimposta (in colorazione) la fluttuazione di pressione

Simulazione di un bruciatore caratterizzato da instabilità termoacustiche per la validazione dei modelli

Il Subtask ha per oggetto l'applicazione la simulazione LES del bruciatore DLR (Deutsches zentrum fur Luft- und Raumfahrt) studiato sperimentalmente nel progetto Europeo "PRECCINSTA". Si tratta di un bruciatore premiscelato e *swirlato* metano-aria, con rapporto di equivalenza 0,7, caratterizzato da instabilità termoacustiche. Esso rappresenta un serio test per la validazione dei modelli predittivi di fenomeni di instabilità.

Viene simulata l'intera geometria del bruciatore, con relativo plenum e palettature, la camera di combustione, il camino e parte dell'aria ambiente. Le attività di modellazione della parte solida del combustore e di generazione della griglia di calcolo sono state concluse nella precedente annualità. La simulazione LES è stata viceversa condotta nel PAR corrente.

La complessa geometria del combustore è stata trattata nel codice comprimibile di ENEA "HeaRT" mediante la nuova tecnica "Immersed Volume" (IVM) sviluppata sempre da ENEA. E' stata adottata una griglia cartesiana strutturata di 55 milioni di nodi assieme ad uno schema cinetico dettagliato per la chimica del metano-aria costituita da 17 specie e 73 reazioni elementari. In questo lavoro sono state descritte le caratteristiche generali della fiamma all'interno del bruciatore. Il campo fluidodinamico all'interno della camera di combustione è diviso in tre zone distinte: la zona di ingresso dei gas miscelati in camera di combustione, una zona di ricircolo interna intorno all'asse del combustore ed una esterna contigua alle pareti. La fiamma è ancorata all'uscita del bruciatore intorno a 0,035 m nella zona di ricircolo interna. Un significativo livello di unmixedness è stato rilevato all'uscita del mozzo conico.

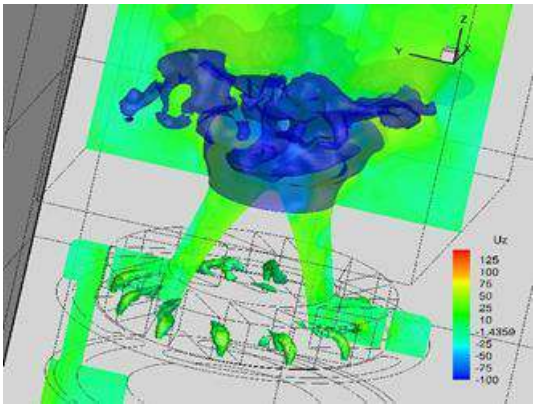


Figura 241. Isosuperficie della variabile di progresso c=0,6. Isosuperfici della mass fraction di CH_4=0,15. Piano a x=0 con velocità assiale istantanea

Questo risultato, anche se parziale, suggerisce che alcuni fenomeni di instabilità termoacustici possano essere intensificati nella fiamma a causa del livello di non perfetta miscelazione. La simulazione è molto onerosa dal punto di vista computazionale, il passo di avanzamento temporale legato alla stabilità numerica degli schemi adottati è di 22 ns. Il calcolo è ancora in atto con lo scopo di simulare un tempo totale di alcuni centesimi di secondo in modo da poter includere nelle statistiche gli effetti delle fluttuazioni di pressione a bassa frequenza (290 Hz). I risultati dello studio sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/271.

Sviluppo di un solutore "multi-zona"

Il Subtask riguarda lo sviluppo di un solutore "multi-zona", cioè di un solutore che consenta la divisione del dominio di calcolo in più zone caratterizzate da forti variazioni della risoluzione spaziale.

Per ottenere risultati più precisi senza dover aumentare in maniera considerevole i tempi di calcolo richiesti, è stata sviluppata, all'interno del codice HeaRT, una tecnica di mesh refinement che prevede la presenza di griglie a diversa risoluzione nel dominio di calcolo: queste griglie integrano in maniera indipendente le equazioni di conservazione e comunicano fra loro, quando hanno raggiunto lo stesso istante temporale, sui nodi di "esterni" (le celle "ghost", necessarie per l'integrazione delle equazioni di conservazione nei punti di zona prossimi al contorno della zona

Per trasferire i valori da una griglia più lasca ad una più fitta è usata un'interpolazione mediante la tecnica dei minimi quadrati, al terzo ordine, che garantisce un'adeguata accuratezza della soluzione sulla griglia raffinata: note le coordinate del punto da interpolare, si costruisce l'interpolatore selezionando tutti i punti della griglia rada che "circondano" il punto fitto nelle tre direzioni; l'interpolazione, inoltre, è effettuata imponendo la conservazione "globale" della grandezza, garantendo cioè che la somma dei valori fitti interpolati (pesati per la frazione di volume della cella fitta rispetto a quella rada) sia pari al valore della cella rada alla quale le celle fitte considerate appartengono.

Per comunicare i valori nel verso opposto (dalla griglia più fitta ad una più lasca), vengono sommati i valori corrispondenti alle celle fitte che sono contenute all'interno di una cella rada, opportunamente pesati mediante la frazione di volume fitto rispetto al volume rado.

La tecnica, dopo un'accurata validazione, è utilizzata nella simulazione di una fiamma premiscelata idrogeno/ metano-aria, in cui la zona centrale (Figura 242) è a risoluzione più alta (griglia rossa), mentre le zone ove il campo presenta gradienti meno marcati sono a risoluzione più bassa (griglia nera).

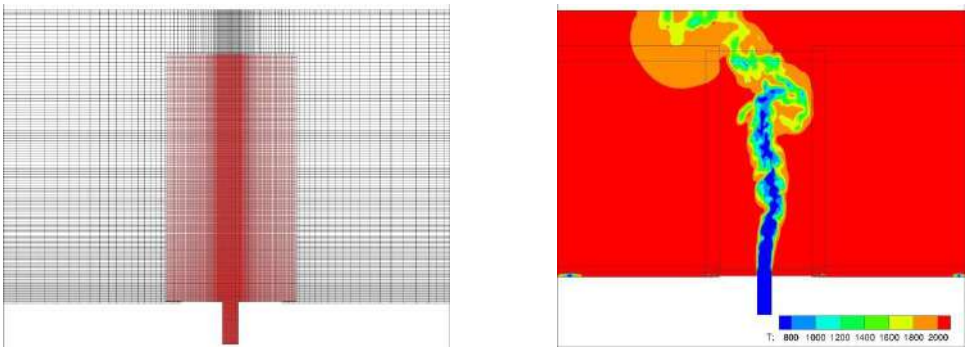


Figura 242. Griglia di calcolo e campo di temperatura (K)

L'attività è stata condotta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale dell'Università di Roma "Sapienza". I risultati sino descritti nel rapporto RdS/PAR2013/293.

Implementazione delle proprietà molecolari di gas in condizioni supercritiche

Il Subtask origina dall'esigenza di simulare, con il codice HeaRT di ENEA, processi di ossi-combustione di gas naturale in combustori di cicli turbogas avanzati a CO_2 supercritica (riferimento all'Obiettivo c Parte A), ciò implica la necessaria implementazione delle proprietà molecolari di gas in condizioni supercritiche nel codice, per rendere lo stesso idoneo alla simulazione di processi in oggetto. Tale attività è svolta in collaborazione con il Dipartimento Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale (DIMA) dell'Università di Roma "Sapienza", in particolare l'implementazione delle proprietà di trasporto di gas in condizioni supercritiche con la relativa equazione di stato è stata svolta da ENEA, mentre il DIMA ha provveduto a validare l'implementazione simulando un caso non reattivo di letteratura relativo al mescolamento di due gas (metano ed ossigeno) in condizioni supercritiche

Il modello attualmente più accurato (e validato con dati sperimentali) per il calcolo delle proprietà delle miscele ad alta pressione, da condizioni sub-critiche a super-critiche, è il GERG-2008. Tipicamente, per ridurre l'onere computazionale, in CFD si ricorre ad equazioni di stato per gas reali semplificate: la più usata è quella cubica di Peng-Robinson. Assunta l'equazione di stato, sviluppando alcune relazioni termodinamiche, si ottengono espressioni per le "departure functions" di alcune grandezze della miscela, come il calore specifico e l'entalpia. Le "departure functions" rappresentano lo scostamento della proprietà dal valore ad una data pressione di riferimento, tipicamente 1 bar. In questo lavoro è stata sviluppata (da parte di ENEA) una nuova strategia per il calcolo delle proprietà di miscele basata sulla tabulazione dei valori esatti (GERG-2008) delle proprietà delle singole specie, e sull'utilizzo di regole di miscelamento opportune per il calcolo delle proprietà di miscela. Questa nuova strategia è stata validata nel caso di miscele binarie metano/ossigeno, ottenendo ottimi risultati in termini di errori percentuali rispetto al GERG-2008. I risultati sono stati buoni anche rispetto agli errori del modello Peng-Robinson per le stesse miscele, come mostrato in Figura 243 relativa ad una miscela CH_4/O_2 (0,5/0,5 in frazioni

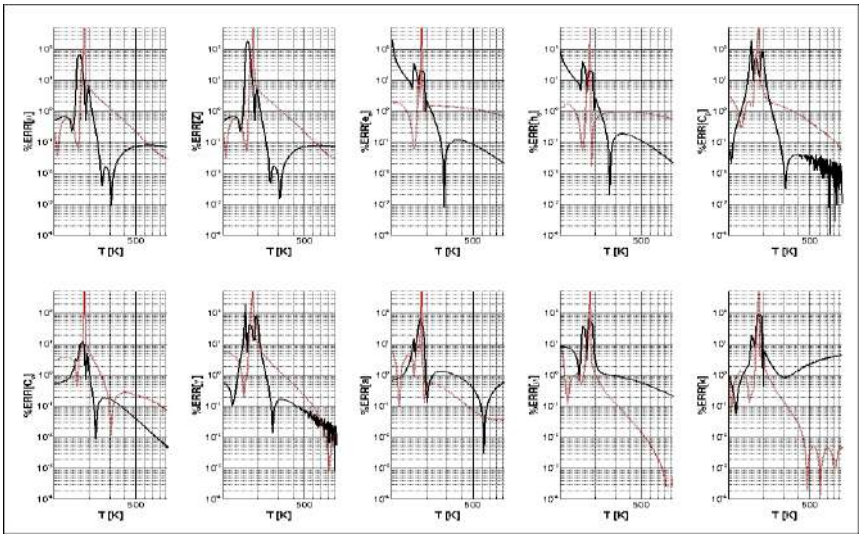


Figura 243. Confronto dell'errore percentuale del modello sviluppato e del modello Peng-Robinson rispetto al GERG-2008 per una miscela CH_4/O_2 (0,5/0,5 in frazioni molari) a 100 bar

molari) a 100 bar. Miglioramenti sono previsti per la viscosità dinamica e la conducibilità termica, e verranno sviluppati nella prossima annualità, con l'estensione della validazione a miscele ternarie ed a più componenti. Il presente lavoro si è concluso con una simulazione (effettuata in collaborazione con l'Università di Roma "Sapienza") relativa al mescolamento di due getti di metano ed ossigeno a 150 bar. I risultati sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/256.

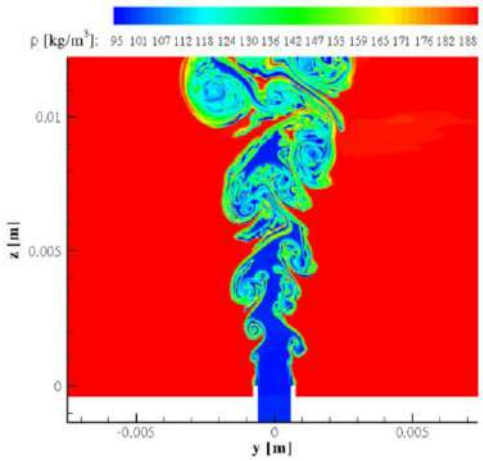


Figura 244. Campo di densità istantaneo relativo al mescolamento di un getto centrale di CH_4 con due getti laterali di O_2 (150 bar)

b.2 Simulazioni CFD con metodi RANS

Sono state condotte simulazioni di tipo Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS, mediate nel tempo) con codice ANSYS-FLUENT per lo studio di combustori, convenzionali e di nuova concezione, in regime di ossi-combustione, e studi relativi a combustori con miscele di syngas.

Bruciatore Trapped Vortex in ossi-combustione

Nel corso delle precedenti annualità è stato messo appunto un prototipo sperimentale di bruciatore funzionante interamente sul principio dei vortici intrappolati (bruciatore ETVB mod.1), in grado di realizzare un ottimale miscelamento dei prodotti di combustione con la miscela ancora non reagita. La possibilità di instaurare un regime di combustione fortemente diluito, se spinta al limite, offre l'opportunità di raggiungere le condizioni di combustione MILD. L'introduzione della combustione MILD per le turbine a gas è di grande interesse perché comporta notevoli vantaggi: 1) basso livello di emissioni come particolato carbonioso (fine ed ultrafine) e idrocarburi policiclici aromatici; 2) stabilità termo-acustica (humming); 3) assenza di picchi di temperatura con conseguente salvaguardia dei materiali. Tutto ciò unito alle intrinseche caratteristiche di un bruciatore trapped-vortex come la possibilità di bruciare combustibili a basso potere calorifico, la stabilità di fiamma e l'estensione dei limiti di spegnimento.

Con lo scopo di verificare il comportamento del dispositivo ENEA in condizioni oxy-fuel e di investigare la possibilità di stabilire un regime di combustione MILD, ne è stato analizzato il funzionamento attraverso simulazioni di tipo termodinamico/cinetico e CFD.

Per quanto riguarda i calcoli cinetici, le analisi sono state condotte all'equilibrio e modellando il bruciatore come un reattore perfettamente miscelato (PSR), adottando un meccanismo cinetico dettagliato e utilizzando il software OpenSMOKE. In generale ci si può aspettare che la combustione oxy-fuel, con diluizione dell'ossigeno in CO_2, porti ad un forte aumento delle emissioni di CO. Senza entrare nei dettagli, per i quali si fa riferimento al rapporto tecnico [rapporto RdS/PAR2013/259), possiamo dire che in definitiva il CO può essere minimizzato operando in eccesso di ossigeno, a basse temperature ed alte pressioni. Di contro per minimizzare l'ossigeno residuo nei fumi occorre lavorare si a basse temperature ed alte pressioni come per il CO, ma ad alto rapporto di equivalenza.

Per quel che riguarda le simulazioni CFD è stata condotta un'analisi di sensibilità in funzionamento premiscelato con alimentazione a metano rispetto alla velocità di iniezione (40-100 m/s), alla diluizione in CO_2 (%O_2 22-27 %), al rapporto di equivalenza (0,9 e 0,95) ed alla temperatura di iniezione (470, 870 K), per una pressione operativa di 4 bar ed una potenza di 150 kW. La temperatura di parete è stata fissata a 1000 K. Il prototipo sperimentale, progettato per alimentazione a syngas e per funzionare in regime diffusivo, presenta diversi fori di adduzione per

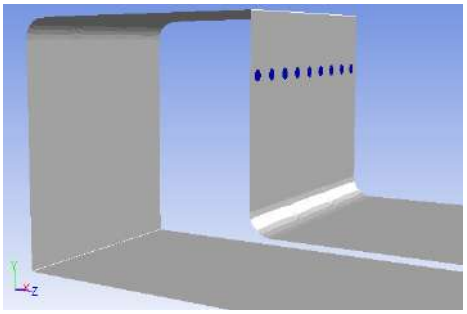


Figura 245. Fila di fori attivi per l'ingresso della miscela

l'aria e per il combustibile. Dato il maggior potere calorifico del metano e considerando il funzionamento in regime premiscelato, nelle simulazioni la miscela viene introdotta soltanto da una fila di fori tangenziali superiori (Figura 245).

Le simulazioni sono state condotte attraverso il codice ANSYS-FLUENT secondo un approccio RANS, utilizzando il modello k-ε per la turbolenza. I modelli adottati per la parte reattiva e per l'irraggiamento sono l'Eddy Dissipation Concept Model, con un meccanismo cinetico comprensivo di 17 specie e 46 reazioni, ed il P1 rispettivamente. Per limitare il costo computazionale è stato simulato soltanto un modulo periodico (1/3 per 50 kW) sul quale è stata realizzata una mesh di circa 500.000 celle.

Alcuni campi risultanti dalle simulazioni sono riportati nelle Figure 246 e 247. E' risultato chiaro che un incremento dell'ossigeno comporta una netta riduzione del CO nei gas esausti, specialmente per bassi valori di O_2, e temperature più alte. Un rapporto di equivalenza più basso causa gli stessi effetti sul CO, ma a temperatura praticamente costante.

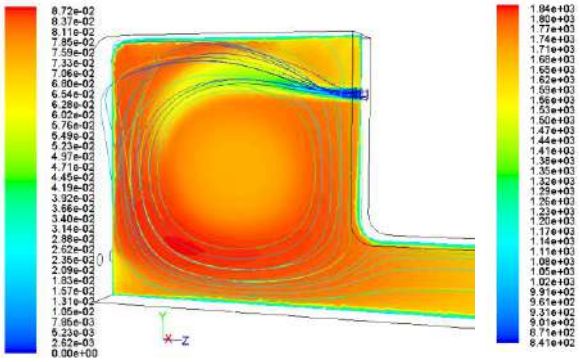


Figura 246. Campo di temperatura (K) e linee di flusso (s). Φ=0,95 T_{in}=870 K

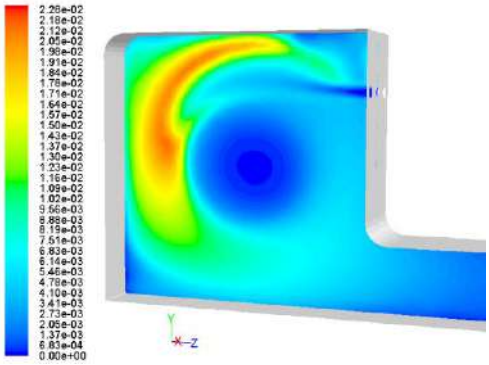


Figura 247. Frazione di massa di CO. Φ=0.95 Tin=870 K

Il fattore di ricircolo Kv , definito come il rapporto tra la quantità di gas ricircolati e la miscela fresca, tende ad aumentare rapidamente all'aumentare della velocità, con conseguente decremento quasi lineare dei picchi di temperatura, fino a raggiungere quasi un valore asintotico. Ciò significa che un ulteriore incremento della velocità non produce grosse variazioni sul fattore di ricircolo. Per le condizioni operative che prevedono un livello di ossigeno inferiore a circa il 30% e T_{in}=870 K, l'incremento di temperatura risulta inferiore alla temperatura di auto ignizione. Così per queste condizioni è valido il criterio probabilmente necessario che stabilisce l'esistenza di un regime di combustione MILD. La cosa non si verifica per T_{in}=470 K. Per tanto con lo scopo di confermare se quelle condizioni operative sono effettivamente capaci di instaurare un regime classificabile come MILD, è stato altresì valutato il volume di reazione, identificato dal rilascio di calore. Risulta evidente che per concentrazioni di ossigeno inferiori al 27% circa, il volume di reazione incrementa di 10 volte rispetto ad un fronte di fiamma più

localizzato, ottenuto per concentrazioni più alte. Si nota pertanto il progressivo allargamento della zona reattiva in cui il rilascio termico diventa sempre meno intenso.

Nel funzionamento in regime diffusivo è stata considerata la configurazione originale, con tutti i fori di immissione alimentati, eccetto la fila di fori tangenziali inferiore, per una potenza di 240 kW. La concentrazione di ossigeno è stata fatta variare tra il 19 ed il 29%. La pressione operativa è 4 bar e la temperatura di alimentazione 870 K. Anche in questo caso la temperatura di parete è stata fissata a 1000 K. Quanto al rapporto di equivalenza si è scelto di lavorare con valori un po' più bassi, intorno a 0,87, quindi con un maggiore eccesso di ossigeno trattandosi di fiamma diffusiva, onde garantire una combustione completa. Dall'analisi dei risultati è possibile trarre le stesse considerazioni fatte per il caso premiscelato. Anche qui le emissioni di CO si riducono all'aumentare della concentrazione di ossigeno e quindi della temperatura, restando invariati per concentrazioni superiori al 19%, contro il 27% del caso premiscelato. Il massimo incremento di temperatura è inferiore alla temperatura di auto ignizione per valori di O_2 inferiori a circa il 22%, contro il 30% del caso precedente. Per ciò che riguarda il volume reattivo invece, i picchi di rilascio termico (HRmax) si abbassano progressivamente al diminuire della concentrazione di ossigeno fino a più di cinque volte, mentre il volume in cui si delocalizza la reazione aumenta dello stesso fattore. Nella configurazione adottata questa volta il fattore di ricircolo si mantiene in generale ben più basso, non superando 1,69, ma la diluizione con i gas combusti è comunque sufficiente e tale da permettere il raggiungimento di risultati simili al caso con premiscelamento.

In conclusione, dall'analisi termodinamica-cinetica scaturisce che in condizioni oxy-fuel le emissioni di CO sono più elevate a causa delle maggiori concentrazioni di CO_2 e che possono essere minimizzate operando in eccesso di ossigeno, a basse temperature ed alte pressioni. Per quanto riguarda l'ossigeno, occorre lavorare a basse temperature ed alte pressioni come per il CO, ma ad alto rapporto di equivalenza.

Attraverso le simulazioni CFD è stato possibile individuare le condizioni operative per le quali è in teoria possibile ottenere un regime di combustione caratterizzato dalla notevole estensione della zona di reazione e dalla forte riduzione dei picchi di rilascio termico, vale a dire di tipo MILD.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/259.

Bruciatori per turbina a gas alimentati a CO_2

E stato effettuato uno studio relativo ad un bruciatore convenzionale per turbina, progettato per la combustione di miscele metano/aria, operante in modalità oxy-combustione. Sono state effettuate simulazioni CFD e calcoli cinetici, determinandone il comportamento in diverse condizioni operative.

Il combustore oggetto di indagine è stato originariamente progettato per funzionare in modalità di combustione "classica", cioè in aria. Ha una potenza termica di 300 kWt e sostanzialmente è formato da un "outer flame tube" che racchiude il volume ricavato per il passaggio dell'aria. All'interno di questo è disposto l'"inner flame tube", che contiene effettivamente la fiamma. Nella parte finale dell'inner flame tube si trovano nove fori di diluizione allo scopo di diminuire la temperatura di uscita dei fumi in modo da non arrecare danno alle pale della turbina che vengono investite dal flusso di gas caldi.

Le simulazioni CFD sono state effettuate con il codice Ansys-Fluent sulla piattaforma CRESCO utilizzando 128 CPU. La griglia di calcolo è di tipo ibrido, per un totale di circa 1,3 Mcelle. Il modello di turbolenza adottato è il k-ε, per la modellistica chimica il modello EDC ed è stato implementato il meccanismo cinetico SMOOKE (17 specie e 46 reazioni), per lo scambio radiativo il modello P1. Al fine di testare la bontà del meccanismo (SMOOKE) sono state effettuate alcune simulazioni cinetiche nelle quali sono stati messi a confronto alcuni meccanismi dettagliati ed alcuni meccanismi ridotti. Dall'esame dei risultati si può dire che il meccanismo SMOOKE rappresenta un buon compromesso per quanto riguarda l'accuratezza dei risultati ed il tempo di calcolo. Partendo dalle condizioni operative di riferimento per la combustione in aria, riportate in Tabella 77, sono stati fatte variare le concentrazioni delle specie coinvolte, i loro rapporti ed il rapporto di equivalenza, così come indicato in Tabella 78. In totale sono stati studiati 11 casi.

Dal punto di vista fluidodinamico il campo di moto è caratterizzato dalla presenza di uno stretto vortice toroidale in prossimità dell'uscita del bruciatore, tipico dei sistemi swirlati. E' presente anche una zona di ricircolo, più grande della precedente ed una zona di ristagno tra il primo vortice e la zona relativa ai getti di diluizione. Il tempo di residenza medio è dell'ordine di $2x10^{-2}$ s.

Tabella 77. Condizioni operative di riferimento

CO_2/ O_2	
MAIN	0,3050 kg/s 870 K
PILOT	0,0226 kg/s 870 K
DILUIZIONE	0,4379 kg/s 870 K
CH_4	
MAIN	0,005942
PLOT	0,001025 kg/s 300 K

Tabella 78. Matrice delle simulazioni effettuate

	F	CO_2/ O_2 %	Φ	DIL
CASO 1	1,2	75/25	0,47	CO_2/O_2
CASO 2	1,5	75/25	0,60	CO_2/O_2
CASO 3	1,5	65/35	0,40	CO_2/O_2
CASO 4	1,5	75/25	0,60	CO_2
CASO 5	1,7	79/21	0,82	CO_2
CASO 6	2	79/21	1	CO_2
CASO 7	2	79/21	1	-
CASO 8	2	77/23	0,90	CO_2
CASO 9	2	75/25	0,83	CO_2
CASO 10	2,4	74/26	1	CO_2
CASO 11	2,4	70/30	0,83	CO_2

In Figura 248 è riportato un esempio di campo termico con sovrapposte le linee di corrente.

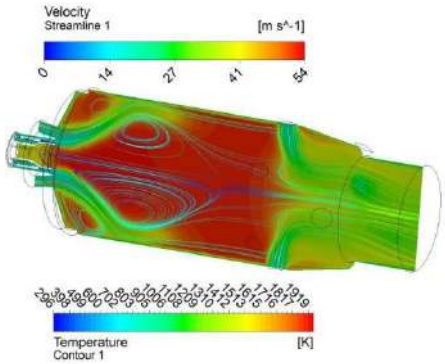


Figura 248. Campo termico con sovrapposte le linee di corrente

Nell'ottica di ottenere una combustione il più possibile completa, senza cioè troppi incombusti in uscita, evitando nel contempo di "sprecare" ossigeno, si è scelto come indice di bontà per la combustione l'indice di emissione (EI) del CO, cioè EICO dato dal rapporto tra i grammi di CO in uscita per kg di combustibile. In Figura 249 è riportato un grafico che riassume i risultati ottenuti nelle simulazioni CFD.

La prima simulazione, non indicata nella tabella, è stata effettuata nelle stesse condizioni di portate del caso di riferimento ad aria, semplicemente sostituendo l'azoto con l'anidride carbonica: in questa situazione si è registrato lo spegnimento della fiamma. Per gli altri casi si è ridotta la portata di CO_2 di un fattore F per diverse concentrazioni di O_2 mantenendo fissa la potenza. Si è quindi proceduto a studiare il comportamento del combustore per tutti gli undici casi

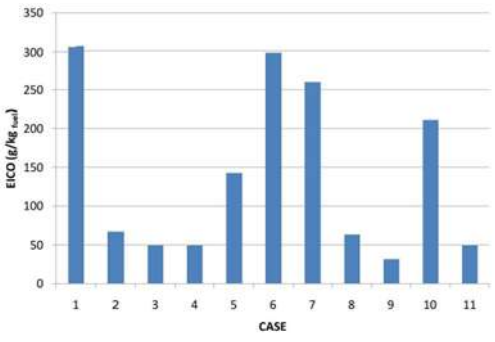


Figura 249. Emission index

illustrati nella suddetta tabella. Le considerazioni che seguono sono state fatte analizzando i risultati delle simulazioni in termini di campi temici e campi di concentrazione delle specie chimiche. Per F=1,2, la concentrazione minima di ossigeno è intorno al 25%. In questo caso la temperatura media nella camera di combustione è abbastanza bassa e si registrano molti incombusti in uscita. Anche per F=1,5 non è stato possibile raggiungere concentrazioni di O_2 inferiori al 25%. In questo caso però le temperature sono risultate più alte del caso precedente. Per F=1,7 è stato possibile ridurre l'ossigeno fino a circa il 21% con un rapporto di equivalenza pari a 0,82. Per prevenire l'estinzione della fiamma ed avere nel contempo condizioni quasi stechiometriche, è necessario arrivare ad F=2. In questo caso si hanno delle alte concentrazioni di CO in uscita. Tuttavia questo non è dovuto alla CO_2 di diluizione. Infatti nel seguente caso numero 7, dove la diluizione è del tutto assente, il risultato è simile. Anche nel caso F=2,4, per il quale in camera di combustione si hanno temperature medie alte, la situazione non migliora. Tutto ciò dipende dal fatto che all'interno del combustore la concentrazione di CO_2 è comunque alta. Questo porta ad una concentrazione di CO all'equilibrio alta e ad un basso rateo di reazione del CO stesso. Dal punto di vista della cinetica chimica la CO_2 compete con l'O_2 per quanto riguarda l'idrogeno atomico (H), portando alla formazione di CO. Anche la reazione della CO_2 con radicali del tipo CH_x gioca un ruolo importante. La competizione della CO_2 per i radicali H, con la reazione $H + O_2 \rightarrow O + OH$, riduce in modo sostanziale la concentrazione dei radicali O, H ed OH.

In conclusione, per sostenere la fiamma è necessario, a parità di combustibile bruciato, ridurre la quantità di anidride carbonica rispetto all'equivalente di azoto della combustione in aria, a causa della maggiore capacità termica. Modeste riduzioni comportano la necessità di operare con concentrazioni di ossigeno relativamente alte, decisamente superiori allo stechiometrico, pena lo spegnimento della fiamma, ma con inevitabile spreco di ossigeno. Riduzioni più consistenti consentono di ridurre maggiormente la concentrazione di ossigeno, fino a poter operare vicino alle condizioni stechiometriche, per una portata di CO_2 dimezzata rispetto a quella di riferimento. Un certo eccesso di ossigeno è comunque necessario in ogni caso per contenere le emissioni di CO.

I risultati dello studio sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/286. Questa attività è prosecuzione di quella impostata nel PAR 2012, con l'effettuazione di una prima serie di simulazioni.

b.3 Sviluppo, progettazione e test di bruciatori avanzati per turbine a gas

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole incremento degli investimenti nei sistemi di generazione elettrica da fonte rinnovabile, con un trend in continua crescita incoraggiato dalla normativa nazionale e comunitaria. Gli obiettivi raggiunti in questo senso, per quanto auspicabili, non sono privi di effetti negativi, dovuti essenzialmente alla scarsa pianificabilità di alcune fonti rinnovabili che ha introdotto nuove criticità nella gestione della rete elettrica. D'altra parte, nel medio/lungo termine la generazione elettrica da fonte fossile continuerà a rappresentare un contributo importante che, tuttavia, già nello scenario attuale deve adattarsi ad una situazione in cui aumenta il grado di flessibilità richiesto e diminuisce il fattore di utilizzo. Entrambi gli elementi appena citati, hanno effetto compressivo rispetto agli utili economici attesi dalla gestione dell'impianto termo-elettrico, sia per gli extra costi dovuti alla maggior frequenza degli interventi di manutenzione, sia per la flessione del volume di produzione.

Gli investimenti sul parco termoelettrico effettuati negli ultimi anni, hanno privilegiato i cicli combinati, la tecnologia attuale che assicura le maggiori prestazioni in termini di rendimento termodinamico e di ritorno dell'investimento. Tuttavia, anche questo tipo di impianti subisce forti penalizzazioni, dovute, per un verso, alla difficoltà di adattarsi alle esigenze di flessibilità richieste da un mercato elettrico che privilegia le rinnovabili in termini di dispacciamento, per l'altro, alla situazione di over-capacity derivata dalla massiccia crescita del volume di produzione delle rinnovabili a cui si è assistito negli ultimi anni. Lo scenario attuale presenta quindi delle criticità non banali in termini di integrazione economicamente sostenibile della produzione "tradizionale" con le fonti rinnovabili.

L'orientamento delle politiche comunitarie sul fronte energetico, 35% di energia prodotta da fonte eolica e solare nel 2020 e 100% di energia elettrica de-carbonizzata nel 2050, implica: i) che l'incremento nella produzione da fonte rinnovabile non pianificabile non si arresterà; ii) che la produzione da fonte fossile dovrà adattarsi all'esercizio flessibile e ridurre le emissioni al minimo; iii) che la fonte fossile e la fonte rinnovabile dovranno operare in maniera sinergica per rendere il sistema di dispacciamento stabile e sicuro.

Interventi di ottimizzazione apportati a bruciatori convenzionali di turbo-gas per ampliare la "load-flexibility"

Nell'ambito del Subtask è stato effettuato lo sviluppo concettuale e la validazione numerica di un nuovo bruciatore ibrido (trapped vortex/premiscelato) per turbina a gas, basato sulla generazione di una zona di ricircolo periferica destinata all'ancoraggio della fiamma.

Tale bruciatore rappresenterà una soluzione "Plug & Play" per l'integrazione nel complesso sistema di combustione di turbine a gas di potenza "heavy duty", di tipo commerciale. Esso permetterà il raggiungimento di elevate prestazioni di "load-flexibility", al fine di rendere una macchina, equipaggiata con siffatti bruciatori, idonea all'integrazione in un rete caratterizzata da una forte componente energetica da fonti rinnovabili.

Sono messe a punto alcune strategie di progettazione di bruciatori per turbogas, orientate all'aumento della load flexibility.

Lo sviluppo di bruciatori che realizzino la "Gas Turbine Lean Flameless" o "Colorless Distributed Combustion" è ancora in una fase sostanzialmente preliminare, mancando ancora una dimostrazione pratica del definitivo adattamento della combustione MILD convenzionale ai tubi di fiamma dei turbomotori. Lo sforzo in tal senso profuso necessita pertanto di un supplementare impulso, affinché ci si possa appieno giovare dei vantaggi che la cercata morfologia della fiamma garantirebbe.

In sintesi nel rapporto RdS/PAR2013/257 sono esposte alcune strategie di progettazione dei bruciatori per turbogas, orientate all'aumento della load flexibility. In particolare sono stati descritti geometricamente, funzionalmente, nonché in termini delle prestazioni attese sulla base di metodi numerici predittivi:

1) Un *"Bruciatore per Turbogas ad Intrappolamento Centrifugo di Fiamme Distribuite"*, che raccoglie nel corpo di un singolo bruciatore, in un inedito assetto di cooperazione sinergica, tutti i più avanzati accorgimenti volti ad indurre la combustione flameless ed altri concepiti ex novo:
   - rimestamento della miscela reagente in un vortice intrappolato; iniezione multipla, distribuita e sequenziale del combustibile; autonoma pre-diluizione dell'aria comburente con gas combusti in ricircolo;
   - stabilizzazione "aerodinamica" per mezzo di vorticatori, "statica" con l'ausilio di cavità ritenitrici ed "acustica" per effetto di piastre forate attentatrici;
2) Un sottosistema per il ricircolo interno dei gas combusti, che permette:
   - di prediluire l'aria comburente con i prodotti di reazione, proprio come nei bruciatori MILD, ma superandone le cause di inestensibilità alle camere di combustione dei turbogas (dissipazioni di calore per ricircolo dei gas combusti attraverso intercapedini ricavate nelle pareti del combustore; perdite di carico introdotte dalle piastre deflettrici impiegate per indirizzare i fumi entro percorsi retrogradi);
   - di contrastare autonomamente la tendenza della fiamma a sfuggire dalle cavità di intrappolamento, rendendo così ogni lobo della fiamma stessa assimilabile al vortice di miscela reagente caratteristico dei TVC di quarta generazione;
   - di compensare le oscillazioni della zona di ricircolo centrale e le instabilità termoacustiche che potenzialmente ne conseguono;
   - di escludere a pieno carico ogni forma di pilotaggio, così da poter estendere il regime Flameless all'intera fiamma e non solo a valle di stadi "induttori" diffusivi o poco parzialmente premiscelati (come negli attuali sistemi "fuel staged");
   - di esaltare l'efficacia del pre-combustore (ai carichi parziali) o del ricircolo (a piena potenza) nel "cancellare" la stratificazione della fiamma, rifornendo con "vitiated air" anche il secondo stadio di alimentazione diffusiva e trasformandolo perciò in un "pilotaggio flameless";
   - di evitare stiramenti della fiamma verso la sezione terminale del combustore, preservandolo dalle insidiose "Acoustic-Entropy Combustion Instabilities".
3) Un sottosistema di alimentazione finemente distribuita della cavità preposta ad accogliere la fiamma principale, che consente:
   - di svincolarsi dal pilotaggio diffusivo (antagonista rispetto allo spargimento della fiamma e promotore delle instabilità da localizzazione forzata persino nei post-combustori TVC);
   - di realizzare l'iniezione attraverso i fitti fori di una piastra profilata, allo stesso tempo parete della cavità e membrana di "rottura" delle oscillazioni termoacustiche .
4) Un sottosistema di raffreddamento della zona di reazione che:
   - costituendosi di alette ben affondate nella miscela reagente ed a loro volta refrigerate dall'interno, supera in efficacia i preesistenti schemi;
   - estende la possibilità di raffreddamento dai combustori convenzionali a quelli basati sul principio del "cavity flameholding", oltretutto in presenza di un'iniezione finemente ripartita. Ne risultano così conciliati, rispetto allo scopo di indurre e sostenere fiamme distribuite, gli effetti del rimestamento tra reagenti e prodotti (TVC), dell'assenza di pilotaggio diffusivo e del minor contenuto di ossigeno nei gas combusti in ricircolo;

- agendo sulla sola fiamma principale, e non sui gas prodotti dallo stadio pilota, permette di utilizzare il pre-combustore come efficace mezzo di contrasto all'effetto destabilizzante di un eventuale eccessivo raffreddamento della cavità ai carichi parziali (quando il pilotaggio è comunque attivo).

Il processo ricorsivo della progettazione fluidodinamica attualmente in corso ha già raggiunto la terza iterazione. Le due geometrie di tentativo già generate hanno messo in luce la reale possibilità di sfruttamento e la potenziale efficacia degli escogitati accorgimenti, fornendo così una validazione preliminare dell'elaborato schema di principio.

In base alle considerazioni fatte nel rapporto RdS/PAR2013/257, sembra logico proseguire le attività di sviluppo del nuovo bruciatore con:

- la ricerca e la definizione di più accurati criteri per l'analisi dei risultati, in base ai quali poter discriminare con sufficiente grado di confidenza tra architetture valide e non (anche quelle già oggetto di simulazione);
- la realizzazione di varianti del nuovo bruciatore "ridotte all'osso", che permettano di verificare economicamente, per via sperimentale, la bontà dei metodi di analisi identificati e, sia pure in forma embrionale, delle elaborate geometrie. Da questo punto di vista sono già stati ipotizzati gli elementi funzionali (modifiche) da applicare al corpo del Bruciatore V64.3A, per trasformarlo con semplici lavorazioni di officina, in qualcosa di intermedio tra l'assetto originario e quello descritto nel rapporto;
- la generazione e la simulazione di nuove, e potenzialmente più efficaci, geometrie corrispondenti al medesimo schema di principio.

L'attività e stata condotta con la collaborazione dell'Università di Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria,

Caratterizzazione sperimentale di un bruciatore "Trapped Vortex"

È proseguita l'attività di caratterizzazione sperimentale del bruciatore Trapped Vortex (ETVB-mod.1, acronimo di ENEA Trapped Vortex Burner) progettato e realizzato durante i precedenti PAR. La tecnologia Trapped Vortex è in grado di realizzare condizioni di combustione MILD, particolarmente indicate per la combustione di gas naturale e di syngas ricchi di idrogeno (assenza del fronte di fiamma, basse emissioni, alta stabilità), combustibili tipicamente di opportunità o prodotti dalla gassificazione del carbone e successivi processi di arricchimento.

Il nuovo bruciatore è caratterizzato da una geometria innovativa, ove l'articolato sistema di alimentazione aria/gas permette di realizzare un dominio regolare di combustione, caratterizzato dal forte ricircolo di prodotti di reazione con effetto di diluizione dei reagenti freschi, che determina riduzione della temperatura adiabatica di combustione e conseguente minimizzazione delle emissioni di NO_x.

Nel corso dell'annualità è stata condotta un'ampia campagna sperimentale sul nuovo bruciatore, installato sull'impianto MICOS di ENEA, attraverso l'uso di trasduttori di pressione e sensori ottici ODC, sviluppati da ENEA, e per l'occasione innovati (versione "ODC-U": ODC-Upgrade) ampliando grandemente lo spettro di sensibilità, il guadagno di amplificazione e la capacità di trasmissione del segnale utile.

La sperimentazione è stata volta alla caratterizzazione del funzionamento stabile del bruciatore in oggetto. Sui segnali acquisiti, ENEA ha applicato tecniche di analisi di tipo convenzionale, mentre l'Università di Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria, nell'ambito di una collaborazione, ha applicato tecniche *wavelet,* considerate le più indicate all'analisi di segnali in evoluzione, e quindi particolarmente idonee alla individuazione di precursori di instabilità.

Nel dettaglio l'attività sperimentale è stata volta ad indagare il range di stabilità del combustore ed a sviluppare gli strumenti diagnostici necessari all'ottimizzazione dello stesso. Il comportamento aeroacustico del TVC è stato studiato sia a freddo che in condizioni reattive, attraverso una serie di campagne di misura effettuate sull'impianto disponibile presso l'ENEA. In una fase preliminare si è verificato il set-up sperimentale esistente e sono stati apportati opportuni miglioramenti, proponendo nuove soluzioni realizzative della catena di misura, con la finalità d'incrementare il rapporto segnale-rumore.

Successivamente, dopo aver pianificato una test-matrix, a completamento di un database precedentemente acquisito, si è proceduto con l'acquisizione dei dati. Nel quadro generale dell'attività, l'ENEA si è occupata degli allestimenti sperimentali, del controllo dell'impianto e dell'acquisizione dei segnali, mentre l'Università di Roma TRE si è dedicata al supporto nelle misure e, soprattutto, all'analisi dei dati. L'analisi è stata condotta per mezzo di tecniche convenzionali, quali l'analisi nel dominio del tempo e della frequenza e tecniche maggiormente avanzate (*analisi wavelet)*.

Mediante l'impiego di trasduttori di pressione e sonde ODC (strumento ENEA), sono state misurate le fluttuazioni di pressione e l'energia radiante generate in camera di combustione.

Le campagne di misura sono state finalizzate alla ricerca ed alla caratterizzazione delle condizioni di transizione e di innesco delle instabilità termoacustica del combustore. A tal proposito, sono stati variati i valori delle portate, per consentire di parametrizzare i risultati in termini di potenza termica e rapporto di equivalenza.

Il principale risultato emerso dall'attività è stato ottenuto dal confronto tra le fluttuazioni di pressione e di energia radiante nel dominio della frequenza. Come mostrato in Figura 250, sono presenti dei picchi in frequenza nelle fluttuazioni di pressione dovuti ad effetti di natura acustica ed in particolare legati al primo modo di risonanza della geometria del combustore. Tali componenti tonali si presentano contemporaneamente nelle fluttuazioni di energia radiante, qualora le condizioni di esercizio dell'impianto siano magre (Figura 250c). Questo comportamento attesta che, sebbene le potenze in gioco siano contenute, il combustore risulta affetto da instabilità termoacustica solo in condizioni di miscela significativamente magra. Pertanto, una strategia di controllo di tale fenomenologia deve considerarsi volta ad un'ulteriore estensione del range di funzionamento.

Lo studio ha portato, come ricaduta scientifica, all'introduzione di una relazione analitica in grado di predire la frequenza del primo modo acustico in condizioni reattive, rendendo l'interpretazione delle componenti tonali nello spettro delle fluttuazioni di pressione particolarmente robusta. In Tabella 79 sono raccolti i valori utilizzati per il calcolo della frequenza del modo acustico, la frequenza misurata sperimentalmente e quella calcolata secondo il modello sviluppato. L'accordo tra la frequenza misurata e quella calcolata è pienamente soddisfacente. Il modello quindi potrà essere utilizzato in futuro in sede di progettazione di combustori di questa tipologia.

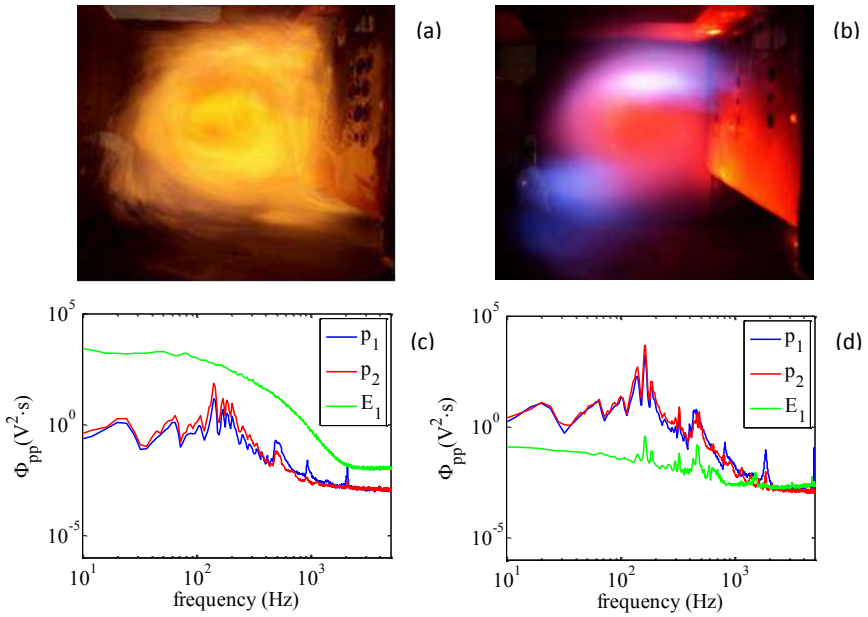


Figura 250. .Immagine della cavità interna al combustore ottenuta in condizioni di miscela grassa Φ_{cav}=1.24 (a) e di miscela magra Φ_{cav} =0.42 (b); spettri di potenza calcolata per due condizioni del rapporto di equivalenza: rispettivamente miscela grassa, Φ_{cav} =1.24 (c); e miscela magra Φ_{cav} =0.42 (d)

Tabella 79. Parametri impiegati per il calcolo della frequenza acustica propria del TVC

D (mm)	d (mm)	Γ	l (mm)	l' (mm)	T (K)	c (m/s)	f_p (Hz)	f_{exp} (Hz)
190	50	4	700	772	1573	795	165	164

I risultati della procedura di trattamento dei dati adottata per lo svolgimento dell'attività d'investigazione della instabilità dei combustori trapped vortex sono sinteticamente riportati di seguito. Lo scopo della procedura è quello di estrarre dai segnali i contributi coerenti e più energetici. L'obiettivo è quello d'identificare la presenza di fenomeni precursori dell'instabilità termoacustica con la finalità di caratterizzare l'eventuale presenza di punti di funzionamento critici dell'impianto. Il codice d'identificazione dei precursori dell'instabilità è stato sviluppato in ambiente LabVIEW e reso disponibile al personale ENEA.

Successivamente, a completamento dell'attività di diagnostica, è stato definito un indice d'instabilità H(t) dipendente dal tempo, perciò indicato per una diagnostica real-time. H(t) assume valori compresi tra 0 ed 1, per valori prossimi ad 1 l'instabilità si manifesta in condizione conclamata.

Un'indagine preliminare è stata condotta allo scopo di testare la strategia di analisi basata sulla trasformata wavelet applicate ad un database estremamente rappresentativo del fenomeno d'instabilità termoacustica. In Figura 251 l'indice è sovrapposto alla time history di un segnale di energia radiante acquisto in un combustore mediante ODC durante un transitorio che porta all'instabilità. Si può notare che in condizioni d'instabilità, nell'intervallo temporale compreso tra i 12 e i 24 s, il valore dell'indice aumenta considerevolmente. Inoltre sovrapponendo i tempi di riferimento delle strutture coerenti del segnale di energia radiante, identificate mediante wavelet, all'andamento dell'indice d'instabilità (Figura 251), si può notare che la frequenza di accadimento di queste strutture aumenta notevolmente nell'intervallo di tempo nel quale il combustore è in regime d'instabilità.

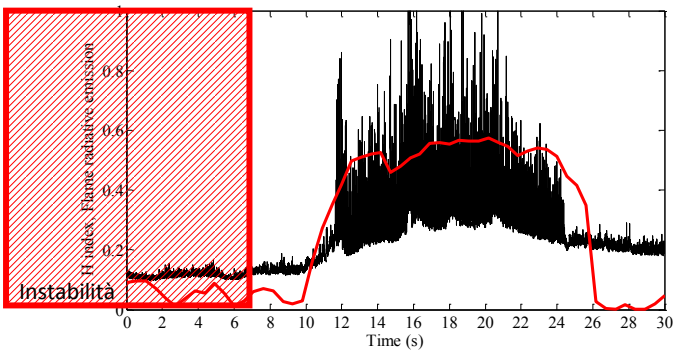


Figura 251. Rappresentazione dell'indice 'instabilità sovrapposto al segnale di pressione

È importante notare, inoltre, che vengono identificate strutture coerenti con largo anticipo rispetto al manifestarsi della condizione d'instabilità. Tali eventi sono perciò precursori dell'instabilità termoacustica.

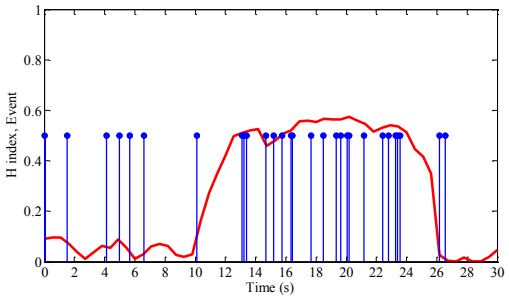


Figura 252. Rappresentazione dell'indice instabilità sovrapposto ai tempi di riferimento t_i del pattern d'instabilità.

Il software che implementa la strategia d'identificazione dei precursori sarà incluso nella procedura di diagnostica real-time dell'instabilità del combustore TVC.

I risultati fin qui illustrati sono stati ottenuti per mezzo di una stretta sinergia tra ENEA e l'Università Roma Tre e sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/258**.** Nel prossimo futuro, si prevede di approfondire ulteriormente, le tematiche descritte nel presente documento mediante ulteriore investigazione sperimentale.

c. Cicli a CO_2

L'attività, interamente a carico ENEA, ha l'obiettivo finale di sviluppare un ciclo Brayton-Joule in configurazione semichiusa che utilizza CO_2 supercritica (S- CO_2) come fluido di lavoro (oltre 31°C e 7,3 MPa), alimentato mediante ossi-combustione di metano. Le ragioni che giustificano il crescente interesse riguardo a questa tecnologia sono molteplici:

- fluido di lavoro non tossico, abbondante ed a basso costo;
- efficienza di ciclo potenzialmente oltre il 50%;
- ingombri fino a 100 volte inferiori rispetto alle tradizionali turbomacchine di pari potenza, a causa dell'alta densità del fluido di lavoro;

- cattura della CO2 prodotta in condizioni di pressione e purezza "pipeline ready" per lo stoccaggio o l'utilizzo nelle tecnologie "Enhanced Oil Regovery" (EOR), senza la necessità di utilizzare facilities specifiche per la cattura e la compressione.

Il primo step di questo programma prevede una serie di esperienze esplorative effettuate, in condizioni sub-critiche, con l'ausilio dell'impianto sperimentale AGATUR.

L'obiettivo immediato dell'attività in oggetto è l'esercizio sperimentale di un ciclo turbogas funzionante con fluidi di lavoro diversi dall'aria, tipicamente, con alte concentrazioni di CO_2. La "visione" correlata con l'attività ha una duplice finalizzazione, abbracciando un obiettivo di medio termine legato alla realizzazione sperimentale di un ciclo turbogas di tipo "Exhaust Gas Recirculation" (EGR) ed un obiettivo di lungo termine connesso con la fattibilità di cicli di potenza a CO_2 supercritica.

Esercire un ciclo EGR equivale potenzialmente a produrre energia elettrica con l'efficienza di un ciclo combinato, con l'ulteriore vantaggio di utilizzare un fluido di lavoro in cui la CO_2 è molto più concentrata rispetto ad un combinato tradizionale con turbogas ad aria, con ricadute positive nell'efficacia e nell'economia del processo di cattura della CO_2. Efficacia ed economia trovano immediata giustificazione se si considera che la presenza preponderante di azoto negli esausti di un turbogas convenzionale rende difficoltosa la cattura a causa della bassa concentrazione di CO_2 nei fumi, oltre a richiedere dispositivi di trattamento di dimensioni molto maggiori a causa dei grandi volumi trattati, con il conseguente aggravio sia in termini di CAPEX che di OPEX.

Per quanto attiene ai cicli a CO_2 supercritica con ossi-combustione, l'attività in oggetto si innesta in due differenti rami di ricerca mirati rispettivamente allo studio della strategia di start-up del sistema, ed alla comprensione di base del fenomeno della combustione in atmosfera sintetica composta prevalentemente da anidride carbonica e ossigeno. Con riferimento alle strategie di start-up dei sistemi di conversione a S-CO_2, una delle ipotesi accreditate è l'avviamento ad aria del turbogas e la progressiva transizione verso un'atmosfera sintetica CO_2/O2 mediante ricircolo degli esausti, con accensione e ramp-up che avvengono pertanto in condizioni sub-critiche.

Con quanto sopra si spiegano le molteplici ricadute connesse con l'implementazione di un impianto sperimentale basato su un turbogas convenzionale, opportunamente configurato per l'esercizio sperimentale adatto alla riproduzione delle condizioni di funzionamento utili alla comprensione delle fenomenologie legate ai temi descritti.

L'ENEA è impegnato nel perseguimento degli obiettivi di medio e lungo termine sopra citati, che assumono concretezza con la progressiva realizzazione della facility AGATUR, di cui la micro-turbina a gas (μGT) Turbec T100 rappresenta il cuore.

La modellazione termodinamica connessa con l'attività in oggetto (Figura 253) è finalizzata alla caratterizzazione del sistema, con l'obiettivo primario di ottenere uno strumento in grado di fornire previsioni di performance utili alla progettazione della facility in corso di completamento e alla definizione preliminare delle prove sperimentali. Il modello realizzato nelle precedenti annualità è stato validato con i dati ottenuti dalle acquisizioni effettuate nel corso di alcune prove appositamente realizzate. Nello specifico, una volta effettuato warm-up, la T100 è stata sottoposta ad una serie di variazioni di carico a gradini di ampiezza costante, in salita fino alla massima potenza e, in discesa, dalla massima potenza fino alla minima potenza stabile. Ad ogni variazione di potenza è seguito un intervallo temporale a potenza costante, utile alla stabilizzazione di tutte le grandezze rilevate, nei limiti della variabilità naturale delle stesse con la macchina a regime. I dati così ottenuti sono stati utilizzati per effettuare la taratura statica e dinamica del modello della μGT realizzato nella precedente annualità.

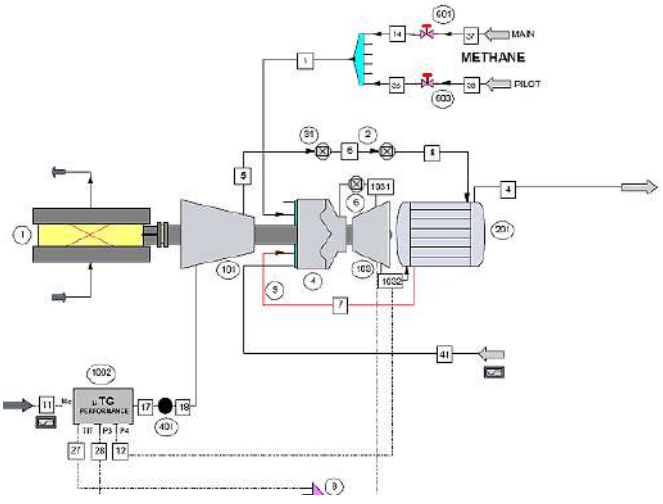


Figura 253. Modello della micro-turbina a gas Turbec T100 realizzato in ambiente ChemCAD

Alla fase di taratura è seguita una prima serie di simulazioni volte alla previsione del comportamento della μGT quando viene sottoposta alla variazione continua del fluido di lavoro, ottenendo una prima valutazione delle variabili di riferimento per il controllo del processo.

Nell'annualità corrente sono stati completati importanti interventi sull'impianto relativi a: adeguamenti del piping, coibentazione, realizzazione di dodici nuovi supporti per tubazioni e componenti (alla luce della stress-analysis condotta) e inserimento di sedici soffietti dilatatori.

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/297.

d. Utilizzo della CO_2 per produzione di combustibili

Il successo delle tecnologie CCUS, quale strumento per la lotta al cambiamento climatico, dipende in maniera decisiva, oltreché dalla tecnologia impiantistica di cattura, dalla capacità di rimuovere in maniera permanente la CO_2 catturata. In questo senso, il sequestro geologico può non risultare l'unica soluzione perseguibile.

Negli ultimi anni sono andate affermandosi, al livello di ricerca, tecnologie innovative relative al riutilizzo della CO_2 prodotta o al suo sequestro chimico. Il tema si pone quindi l'obiettivo di valutare i limiti di tali tecnologie e le condizioni che le rendono convenienti.

La CO_2 derivante da impianti di potenza o da processi industriali energivori può essere impiegata per la sintesi di prodotti chimici di base, di polimeri, e in particolare di combustibili (metano, DME, metanolo, ecc.). Dal punto di vista quantitativo, l'applicazione più rilevante è certamente la sintesi dei combustibili poiché sono questi i prodotti che hanno un mercato più vasto e perché rappresentano un modo di stoccare chimicamente l'energia prodotta da fonti rinnovabili o di accumulare l'energia prodotta in eccesso, la sintesi di combustibili, infatti, richiede la riduzione della CO_2 con H_2 che a sua volta può essere ottenuto dall'acqua per elettrolisi alimentata da fonte rinnovabile.

Le esperienze condotte dall'ENEA in tema di utilizzazione della CO_2 hanno permesso di acquisire adeguate conoscenze che permettono un aumento di scala nell'approccio alla conversione di CO_2 in CH_4. L'impianto "Fenice" (Figura 254), è stato completato in ogni sua parte ed è entrato in esercizio nel marzo del 2014. Questo impianto consente di trattare fino a 200 NL/h di CO_2 e di ottenere un'equivalente quantità di metano. L'elettrolizzatore che fornisce l'idrogeno (750 NL/h) è del tipo a doppia alimentazione, cioè da rete elettrica o da fotovoltaico, e consente quindi di testare l'intero ciclo di stoccaggio dell'energia solare sotto forma chimica. Nel rapporto RdS/PAR2013/290 è illustrato in dettaglio l'impianto e sono discussi i primi risultati ottenuti.



Figura 254. Impianto Fenice

L'impianto "Fenice" è stato realizzato con l'intento di offrire una soluzione al trattamento di CO_2 proveniente da sorgenti puntuali in cui il gas sia presente a concentrazioni elevate. L'impianto non è dotato di alcun sistema di trattamento per il gas in ingresso che deve perciò essere fornito privo di particolato sospeso, e privo di composti solforati. Questi ultimi, infatti, sono molto dannosi nei confronti del catalizzatore che ne risulterebbe avvelenato. L'impianto, nella foto, è del tipo mobile per consentirne il facile trasporto presso la sorgente di CO_2.

La possibilità di usare un reattore metallico consente di lavorare in pressione e quindi verificare l'effetto della pressione sulla resa di reazione. Per l'attività su "Fenice", si è scelto di utilizzare solo catalizzatori commerciali che hanno mostrato caratteristiche superiori rispetto a quelli preparati nel nostro laboratorio. Con 67,4 g di catalizzatore BASF RP-61 (un catalizzatore non specifico per la metanazione) ed un volume catalitico di 98,5 cm^3, l'andamento della resa di conversione in funzione della pressione è riportato in Figura 255 e si riferisce ad una miscela di alimentazione costituita da 2,8 L/min di H_2 e 0,7 L/min di CO_2, quindi in condizioni stechiometriche (H_2/CO_2 = 4/1); la temperatura è di 365 °C.

È stato osservato un incremento della resa di conversione con la pressione, come atteso per una reazione che procede con la riduzione del numero di moli gassose. Le rese vanno da poco più del 40% in condizioni di pressione atmosferica a circa il 60% a 4 bar.

Con un catalizzatore BASF G1-85, (specifico per la metanazione), è stato possibile lavorare in condizioni prossime a quelle ottimali ed il sistema è stato testato in varie condizioni di temperatura, pressione e rapporti di flussi H_2/CO_2. I risultati sono riassunti nella Figura 255 che riporta la resa di conversione in funzione della temperatura in varie condizioni sperimentali. Il catalizzatore è BASF G1-85 e la sua massa è 207,7 g; la lunghezza del letto catalitico è 10,5 cm ed il volume catalitico è 258.5 cm^3.

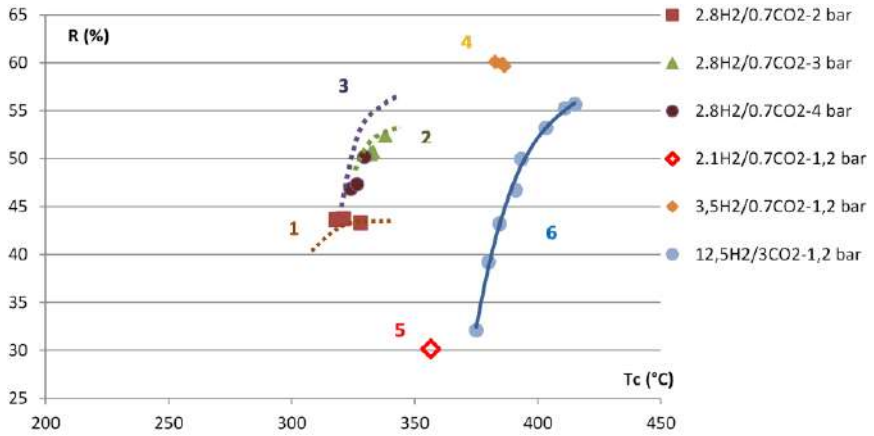


Figura 255. Resa di conversione in funzione della temperatura in varie condizioni sperimentali

Anche per il catalizzatore G1-85 è verificato l'effetto positivo dell'aumento della pressione sulla resa di reazione come può essere verificato p.e. dal confronto fra le curve 1, 2, 3, che si riferiscono rispettivamente alle pressioni di 2, 3 e 4 bar. La miscela di alimentazione è costituita da H_2 2,8 L/min e CO_2 0,7 L/min, quindi una miscela stechiometrica. L'effetto del rapporto fra i gas di alimentazione è evidente nel confronto fra i punti 4 e 5. Nel caso di miscela sotto stechiometrica (punto 5: H_2 2,1 L/min e CO_2 0,7 L/min) si ottiene una resa di conversione intorno al 30%, mentre per miscele sovra stechiometriche (punti 4: H_2 3,5 L/min e CO_2 0,7 L/min) la resa di conversione è intorno al 60%; per entrambe la pressione è 1,2 bar.

L'aumento del flusso totale, quindi la riduzione del tempo di contatto, ha naturalmente l'effetto di ridurre la resa di conversione e quindi sono necessarie temperature più elevate: questo è evidente dall'andamento 6.

LINEA PROGETTUALE B1

Nella Linea Progettuale B1 vengono proposte ed affrontate tecnologie con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, che vengono applicate e studiate su facility di prova di scala pilota pre-industriale, di proprietà SOTACARBO S.p.A., che è anche l'organo esecutore di riferimento della Linea.

a. Cattura della CO_2 in post e pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi

Nel corso dell'annualità, sono state eseguite le attività di modifica e integrazione di alcune sezioni dell'impianto pilota e dimostrativo. Sono stati, inoltre, eseguiti dei test preliminari per verificare la funzionalità dei sistemi costituenti i due impianti, a seguito delle modifiche e integrazioni effettuate. Successivamente sono state avviate le sperimentazioni relative a:

Impianto pilota

- ottimizzazione del processo di gassificazione;
- ottimizzazione del processo di cattura della CO_2 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;
- ottimizzazione del processo di cattura della CO_2 mediante l'impiego di solventi liquidi a base di ammine, in condizioni di pre-combustione.

La durata complessiva dei test preliminari e delle sperimentazioni eseguite dal 01.10.2013 al 30.09.2014 è stata rispettivamente pari a 100 e 138 ore.

Impianto dimostrativo

- esecuzione di test in bianco sull'impianto dimostrativo, per la verifica della funzionalità delle varie sezioni di impianto;
- esecuzione del primo test sperimentale sull'impianto da 5 MWt.

La durata complessiva dei test preliminari e delle sperimentazioni eseguite dal 01.10.2013 al 30.09.2014 è stata rispettivamente pari a 400 e 72 ore.

a.1 Test di gassificazione presso la piattaforma pilota Sotacarbo

Nell'ambito del presente task sono state modificate e integrate alcune parti d'impianto come di seguito descritto:

1. ri-progettazione del sistema di scarico automatico delle ceneri per permettere al sistema di avere una leggera sovra-pressione (circa 50 mbar) per non consentire il contatto delle ceneri scaricate con l'atmosfera esterna (Figura 256a);
2. progettazione della modifica delle guardie idrauliche dell'impianto al fine di aumentare la pressione di funzionamento dell'impianto da circa 80 mbar a circa 130 mbar (Figura 256b);
3. riprogettazione dei pozzetti di raccolta delle acque reflue provenienti dal sistema di pulizia gas (scrubber e desolforazione a freddo) che attualmente risultano sottodimensionati;
4. preparazione dell'impianto per la successiva fase di sperimentazione di gassificazione di carbone, miscele di carbone.

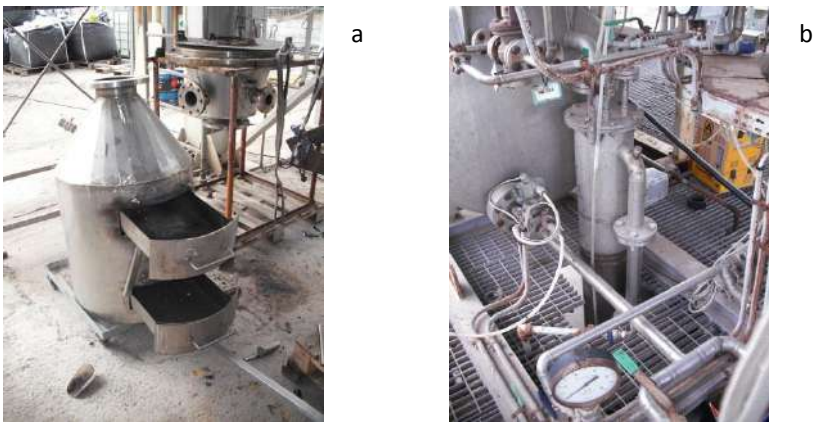


Figura 256. Nuovo sistema di scarico ceneri (a), guardie idrauliche modificate (b)

Nell'ambito del presente task realizzativo sono stati svolti, sull'impianto pilota, test preliminari e sperimentazioni per ottimizzare il processo di gassificazione con miscele di carbone Sulcis e biomasse (cippato di legno, pellet).

I combustibili utilizzati nelle prove sono stati caratterizzati presso i laboratori Sotacarbo con differenti metodi di analisi. La Tabella 80 riporta, in sintesi, i risultati medi delle analisi effettuate sui diversi campioni di combustibile.

Tabella 80. Caratteristiche dei combustibili utilizzati durante tutte le sperimentazioni effettuate

Analisi immediata (% in peso)	Carbone Sulcis	Pellet	Cippato di legno (pino)	Cippato di legno (eucalipto)
Carbonio fisso	34,22	0,01	19,95	19,15
Umidità	4,70	7,17	735	7,84
Sostanze volatili	41,22	73,79	66,20	63,03
Ceneri	19,86	1,30	6,61	9,92
Carbonio totale	55,85	45,00	45,60	39,40
Idrogeno	4,65	5,90	5,66	4,94
Azoto	1,48	0,035	0,58	0,18
Zolfo	6,63	0,01	0,16	0,01
PCS (cal/g)	5399,14	4457,57	4652,30	3487,20

Le attività sperimentali eseguite sono sintetizzate nel seguito.

Prova 14.05.2014

Sono state avviate le seguenti sezioni: gassificazione, scrubber, I stadio di desolforazione freddo con soda e torcia. I principali obiettivi della prova sono stati:

- valutare le prestazioni del processo di gassificazione utilizzando una miscela di combustibili, quali: circa 44% di carbone Sulcis e circa 56% di pellet, aventi granulometria controllata (8÷15 mm) e caratterizzati da una densità apparente rispettivamente pari a circa 800 g/dm^3 e 650 g/dm^3;
- valutare il processo di desolforazione a freddo con soda nel primo stadio;
- valutare la distribuzione delle temperature sulle pareti del gassificatore.

Sono stati analizzati i dati dei principali parametri operativi (portate, temperature e pressioni) e i dati sulla composizione del syngas rilevati dal gas cromatografo Agilent 3000. In alimentazione al gassificatore sono stati utilizzati 93,6 kg di carbone Sulcis e 118,3 kg di pellet, per un totale di 211,9 kg della miscela dei combustibili. La prova ha avuto una durata di circa 16 ore.

Dall'analisi dei dati è emerso che:

- il syngas prodotto ha presentato le seguenti caratteristiche: concentrazione di idrogeno pari a circa il 7%, concentrazione di CO pari a circa il 22%, concentrazione di CO_2 pari a circa il 5%, un rapporto CO/CO_2 di circa 3,84 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H_2/CO pari a 0,3 kg_{H2}/kg_{CO};
- il consumo di carbone è stato di 10÷12 kg/h;

Dal confronto con le altre prove effettuate le condizioni di funzionamento del gassificatore sono risultate più stabili rispetto alle prove condotte con una miscela di carbone e cippato di legno.

Prova 29.05.2014

Sono state avviate le seguenti sezioni: gassificazione, scrubber, I stadio di desolforazione freddo con soda e torcia. I principali obiettivi della prova sono stati:

- valutare le prestazioni del processo di gassificazione utilizzando una miscela di combustibili, quali: circa 44% di carbone Sulcis e circa 56% di pellet, aventi granulometria controllata (8÷15 mm) e caratterizzati da una densità apparente rispettivamente pari a circa 800 g/dm^3 e 650 g/dm^3;
- valutare il processo di desolforazione a freddo con soda nel primo stadio;
- valutare la distribuzione delle temperature sulle pareti del gassificatore.

Sono stati analizzati i dati dei principali parametri operativi (portate, temperature e pressioni) e i dati sulla composizione del syngas. In alimentazione al gassificatore sono stati utilizzati 108 kg di carbone Sulcis e 136,5 kg di pellet, per un totale di 244,5 kg della miscela dei combustibili. La prova ha avuto una durata di circa 16 ore. Dall'analisi dei dati è emerso che:

- il syngas prodotto ha presentato le seguenti caratteristiche: concentrazione di idrogeno pari a circa il 7,8%, concentrazione di CO pari a circa il 23%, concentrazione di CO_2 pari a circa il 9%, un rapporto CO/CO_2 di circa 2,57 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H_2/CO pari a 0,33 kg_{H2}/kg_{CO};
- il consumo di carbone è stato di 10÷12 kg/h;

I dati rilevati confermano quelli della prova del 14.05.2014 eseguita con le stesse modalità.

Prova del 5.06.2014

Per lo svolgimento della prova sono state avviate le seguenti sezioni: gassificazione, scrubber, I stadio di desolforazione freddo con soda e torcia. I principali obiettivi della prova sono gli stessi della prova precedentemente descritta.

In alimentazione al gassificatore sono stati utilizzati 93,6 kg di carbone Sulcis (117 L) e 118,3 kg (182 L) di pellet, per un totale di 211,9 kg della miscela dei combustibili. La prova ha avuto una durata di circa 16 ore. Dall'analisi dei dati è emerso che:

- il syngas prodotto ha presentato le seguenti caratteristiche: concentrazione di idrogeno pari a circa il 7%, concentrazione di CO pari a circa il 24%, concentrazione di CO_2 pari a circa il 6%, un rapporto CO/CO_2 di circa 4 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H_2/CO pari a 0,29 kg_{H2}/kg_{CO};
- il consumo di carbone è stato di 10÷12 kg/h.

I dati rilevati confermano quelli delle prove del 14.05.2014 e 29.05.2014 eseguite con le stesse modalità.

Maggiori dettagli sulle prove eseguite e relativi risultati sono illustrati nel rapporto RdS/PAR2013/273.

Nell'ambito del presente task sono stati stipulati con l'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali due contratti di ricerca per lo sviluppo di un modello dettagliato dell'impianto di cattura postcombustione della CO_2 utilizzando il Custom Modeller dell'ASPEN e per l'analisi dell'integrazione di impianti a vapore Ultra Supercritici (USC) dotati di tecnologia CCS e sistemi solari a concentrazione. I risultati di queste attività sono descritti rispettivamente nei rapporti RdS/PAR2013/274 e RdS/PAR2013/275.

a.2 Test di separazione della CO_2 da syngas presso impianto Pilota di Sotacarbo

Nell'ambito del presente task sono state eseguite sia prove di cattura della CO_2 in post-combustione che in pre-combustione. In particolare per lo studio della cattura della CO_2 post-combustione sono stati svolti, sull'impianto pilota, test preliminari e sperimentazioni per ottimizzare il processo 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.

Mentre per lo studio della cattura della CO_2 in pre-combustione è stato utilizzato il reattore a bolle (SAC) posto lungo la linea a caldo, utilizzando ammina quale solvente, e la sezione di rigenerazione delle ammine per analizzare il funzionamento a ciclo continuo del sistema di assorbimento-rigenerazione.

Una descrizione dettagliata delle prove eseguite è riportata nel rapporto RdS/PAR2013/276, nel seguito si riportano alcune considerazioni di sintesi derivanti dalle analisi dei dati sperimentali.

Prestazioni del processo di separazione della CO_2

Nella Tabella 81 sono stati riportati i dati sperimentali principali dei test riguardanti la separazione della CO_2 in post-combustione ed in pre-combustione. Da una comparazione dei dati delle due tipologie di prova si nota che all'aumentare della concentrazione di CO_2 diminuisce l'efficienza di assorbimento (a parità degli altri parametri di processo: rapporto L/G, configurazione impiantistica, durata del ciclo di assorbimento/rigenerazione).

Tabella 81. Prestazioni nella sezione di assorbimento

Tipologia	Test sperimentale post combustione	Test sperimentale Pre combustione
Portata miscela gassosa (kg/h)	20	20
Concentrazione iniziale di CO_2 (% in vol)	15	8-12
Solvente	MEA	MEA
Portata ammina dm^3/h	85	85
Rapporto medio L/G	4	4
Numero cicli	3	3
Durata di un ciclo (min)	180	180
Efficienza media rimozione al primo stadio	51%	86%
Efficienza media rimozione al secondo stadio	61%	90%
Efficienza media rimozione totale	81%	98,7%

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 ma anche chimico del solvente.

Prestazioni dei processo di rigenerazione dei solventi

Dai dati riportati in Tabella 82 emerge che durante i test sperimentali condotti nell'ambito del presente progetto di ricerca, essendo stata aumentata la temperatura di preriscaldo dell'ammina portandola dai 40 -50°C ad 80 °C, è fortemente diminuita l'energia consumata dall'ebollitore di fondo della colonna di rigenerazione ed aumentata l'energia consumata dal riscaldatore elettrico deputato al preriscaldo.

Tabella 82. Prestazioni nella sezione di rigenerazione

Test	17.04.2014	12.06.2014
Portata CO_2 desorbita (Nm^3/h)	1,5/2	1,5/2
Portata ammina (dm^3/h)	85	85
Set point livello liquido in colonna (mm)	155	155
Temperatura di regolazione ribolliture (°C)	120-122	120-122
Potenza elettrica preriscaldo (kW)	4	4
Potenza elettrica ribollitore (kW)	7	8
Temperatura preriscaldo ammina (°C)	80	80
Set point pressione in colonna (mbar)	800	800
Solvente	MEA	MEA
Temperatura preriscaldo ammina	80°C	80°C

Considerazioni sul consumo energetico specifico nel processo di rigenerazione del solvente

In Tabella 83 si riporta una sintesi dei dati relativi all'energia specifica assorbita dal ribollitore dell'impianto di separazione delle ammine, ottenuti a partire dai dati medi registrati durante il funzionamento dell'unità.

Tabella 83. Confronto tra le prestazioni riscontrate nelle prove di assorbimento

Tipologia	Test sperimentale post combustione	Test sperimentale Pre combustione
Potenza elettrica ribolliture (kW)	7	8
Portata CP_2 (kg/h)	3,5	3
Energia specifica consumata al ribolliture ($kWh/kgCO_2$)	2	2,7

Dalla tabella emerge che il consumo energetico specifico per il desorbimento della CO_2 si discosta dal valore di letteratura (pari a circa 0,8-1 $kWh/kgCO_2$) essendo pari a 2-2,7 $kWh/kgCO_2$. La portata di CO_2 riportata in tabella è quella che deriva dai bilanci di materia relativi alla CO_2, considerando quella misurata dal rotametro affetta da errore. Rispetto ai test sperimentali ottenuti nella precedente annualità, si può affermare che il consumo energetico specifico per kg di CO_2 desorbita è diminuito, anche se è aumentato il consumo energetico per preriscaldare l'ammina. A tal proposito va però specificato che negli impianti di taglia industriale tale energia viene recuperata dal calore presente nell'ammina rigenerata, che deve essere raffreddata dalla temperatura di rigenerazione 110-120 °C a 30 °C attraverso uno scambiatore rigenerativo e non un riscaldatore elettrico.

Conclusioni

La campagna sperimentale sul processo della cattura della CO_2 e sul processo di rigenerazione dei solventi presso la piattaforma pilota Sotacarbo è stata programmata ed eseguita al fine di approfondire le conoscenze del processo e ottimizzare le prestazioni dell'impianto in condizioni operative generalmente differenti da quelle testate nelle precedenti campagne sperimentali.

Particolare attenzione è rivolta all'unità di rigenerazione: si è ridotto il consumo elettrico del ribollitore migliorando la gestione e il controllo dello stesso. In particolare è stato testato ed ottimizzato il funzionamento del sistema di regolazione e controllo PID dell'inverter del ribollitore elettrico; inoltre è stata introdotta la misura on-line della densità dell'ammina rigenerata ed esausta.

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. Esse riguardano principalmente i seguenti aspetti:

1. Test con differenti solventi nei reattori a bolle;
2. Ulteriore ottimizzazione del sistema di gestione e controllo dell'unità di rigenerazione;
3. Aumento del numero dei cicli di assorbimento/rigenerazione.

Co-gassificazione di carbone e biomasse

L'attività riguarda l'adattamento dell'impianto "Dimostrativo" di gassificazione, già presente presso il Centro Ricerche Sotacarbo, per l'effettuazione di test di co-gassificazione di carbone e biomasse da filiera corta (come il cippato), con produzione di un syngas da impiegarsi per la generazione elettrica.

a.3 Progetto e realizzazione delle modifiche dell'impianto dimostrativo SOTACARBO

L'impianto dimostrativo è costituito dalle sezioni di gassificazione, pulizia gas e torcia. In particolare, il combustibile solido, mediante opportuno sistema di caricamento, viene alimentato dall'alto al gassificatore a letto fisso in controcorrente, mentre la miscela gassificante (vapore surriscaldato miscelato alla corrente di aria) viene inviata al sistema distributore del reattore posto nella parte bassa dello stesso, in controcorrente rispetto al combustibile solido. Un agitatore (stirrer) immerso nel letto solido provvede ad omogeneizzare il letto medesimo. Il reattore è raffreddato tramite camicia alimentata ad acqua ed il raffreddamento viene effettuato tramite l'evaporazione stessa. Il vapore prodotto va ad un condensatore ad aria a convezione forzata che condensa il vapore. La fase condensata viene nuovamente alimentata alla camicia. La circolazione dell'acqua nel circuito di raffreddamento (camicia e condensatore) avviene tramite circolazione naturale.

Lo stirrer è raffreddato tramite circuito chiuso con acqua in fase liquida che ne percorre l'interno e provvede al suo raffreddamento rimanendo in fase liquida. La circolazione dell'acqua avviene tramite pompe. Lo smaltimento dell'energia termica asportata dall'acqua di raffreddamento avviene per dispersione in ambiente in un serbatoio polmone dimensionato opportunamente. Il gas di sintesi così ottenuto in uscita dal reattore viene inviato ad una sezione di abbattimento di temperatura, del TAR, del particolato e dei composti solforati.

Quest'unità di processo è costituita da uno scrubber, che, realizzando un netto abbassamento della temperatura dei fumi in uscita dal gassificatore (300-450 °C), permette la condensazione dei composti organici condensabili trascinati dal flusso gassoso. Il particolato presente viene lavato con acqua e soda dalla corrente gassosa mediante trascinamento dell'acqua di lavaggio.

Il syngas così ottenuto, purificato, raffreddato e saturo di umidità, è inviato alla torcia assieme all'aria comburente a 20°C e al gas combustibile ausiliario (GPL) per permettere il processo di combustione e smaltimento del syngas.

Nell'ambito del presente task sono state verificate, progettate e modificate alcune parti dell'impianto dimostrativo costituito dalle sezioni di gassificazione, di lavaggio del syngas tramite uno scrubber e da una torcia. In particolare le attività svolte hanno riguardato:

Ri-progettazione del sistema di scarico automatico delle ceneri

Nel periodo aprile e maggio si è proceduto allo smontaggio ed alla verifica del sistema di scaricamento delle ceneri, a causa dei problemi riscontrati durante il collaudo.

Da una prima analisi del sistema di scaricamento delle ceneri si è valutato che le problematiche di funzionamento di tale sistema sono imputabili al progetto iniziale. Per questo motivo tutto il sistema di scarico è stato smontato e si è proceduto alla modifica della sistema di movimentazione della griglia secondo le specifiche elaborate congiuntamente ai tecnici dell'ENEA.

Modifiche al sistema di caricamento combustibile

Il sistema di caricamento del combustibile al gassificatore è composto da un paranco per il sollevamento dei big bag contenenti la miscela di carbone e biomassa, che vengono posizionati su una tramoggia di caricamento, collegata alla parte superiore del gassificatore, il riempimento di tale sistema viene monitorato con dei misuratori di livello. E' stato necessario, visto il lungo periodo di fermo, revisionare e collaudare i vari componenti del sistema per garantire il corretto funzionamento durante i test sperimentali.

Sistema di raffreddamento della camicia del gassificatore

Il controllo delle temperature sulle pareti del gassificatore è effettuato tramite un sistema di raffreddamento a ciclo chiuso che utilizza l'acqua come vettore. In particolare il liquido scambia calore lungo una camicia di raffreddamento. Conseguentemente il vapore, che si forma nella camicia, giunge, per circolazione naturale, nel corpo cilindrico superiore dove condensa. L'intero sistema è stato revisionato e testato. In Figura 257 si riportano rispettivamente il corpo cilindrico ed il condensatore.

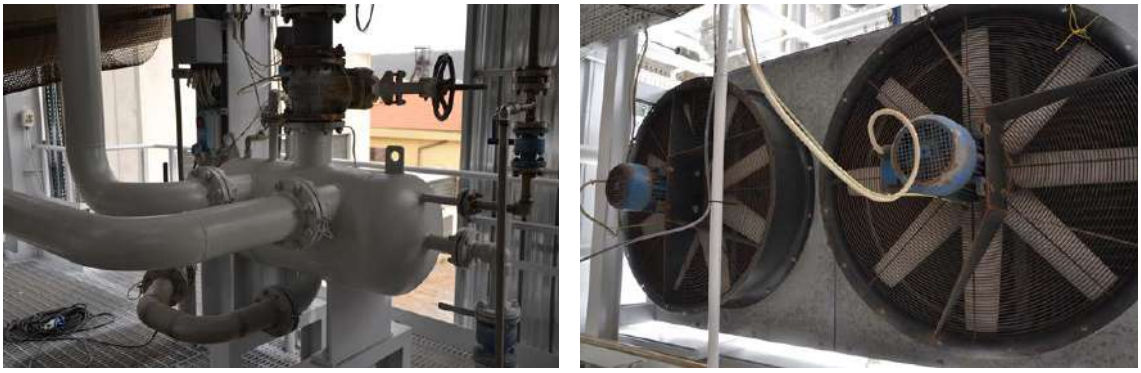


Figura 257. Corpo cilindrico e condensatore

Sistema di movimentazione del letto del gassificatore (stirrer)

Il sistema di movimentazione del letto del gassificatore (stirrer) è costituito principalmente da un albero verticale cavo (per poter effettuare il raffreddamento), un'asta perpendicolare posta all'estremità inferiore dell'albero e dotata di rostri per effettuare il mescolamento del letto, un pistone oleodinamico dotato di centralina che permette al sistema di traslare verticalmente, un motore per assicurare la rotazione dello stirrer, un sistema di circolazione del fluido refrigerante all'interno dello stirrer. Questo sistema è stato completamente revisionato e collaudato e sono state risolte diverse problematiche riguardanti le logiche di funzionamento.

Sistema di accensione del gassificatore

Il sistema di accensione dell'impianto dimostrativo è costituito da sei irradiatori ceramici inseriti, ciascuno, in una custodia metallica, disposti su una corona circolare a 60 gradi l'uno dall'altro. Ciascun irradiatore è stato testato ed, eventualmente, sostituito prima dell'effettuazione delle prove sperimentali.

Sistema di adduzione agenti gassificanti

Il sistema di adduzione degli agenti gassificanti, aria processo e vapore, è costituito da una soffiante con una portata d'aria massima pari a 1.100 m^3/h e da due caldaie in grado di produrre una portata di vapore pari a 250 kg/h ciascuna.

Sono state effettuate verifiche di funzionalità sui seguenti componenti del sistema:

- circuito aria processo e aria irradiatori di accensione gassificatore;
- soffiante con la misura della portata di aria;
- condotte di alimentazione dell'aria processo al sistema di accensione e al sistema di scarico ceneri del gassificatore;
- generatori di vapore;
- condotte di alimentazione del vapore al gassificatore.

Sistema scrubber scarico e stoccaggio reflui

Il sistema scrubber (Figura 258) è composto da due serbatoi uno adibito al lavaggio e raffreddamento del syngas e l'altro alla decantazione dei reflui presenti. Sono state effettuate verifiche di funzionalità sui seguenti sistemi e componenti dello scrubber:

- sistema di ricircolo acqua di lavaggio del syngas.
- strumentazioni a servizio dello scrubber.
- sistema di scarico reflui.



Figura 258. Scrubber tank di lavaggio

Torcia

La torcia è composta da: un sistema di adduzione GPL, un sistema di accensione con fiamma pilota, una camera di combustione, un cammino di evacuazione fumi, un ventilatore aria comburente. La torcia funziona in maniera completamente automatica gestita tramite un sistema di controllo indipendente. Sul sistema sono

state eseguite le verifiche funzionali a seguito delle quali si è deciso di sostituire il PLC a causa del suo non corretto funzionamento.

Sistema di stoccaggio e adduzione azoto

Il sistema di stoccaggio e adduzione azoto all'impianto dimostrativo è composto da un serbatoio di stoccaggio dell'azoto in fase liquida, un sistema di vaporizzatori per trasformare l'azoto liquido in gas ed un sistema di decompressione per regolare la pressione dell'azoto a circa 0,5 bar. L'azoto è utilizzato per l'inertizzazione dell'impianto all'avvio ed al termine di ogni campagna sperimentale, inoltre è necessario in caso di spegnimento rapido del gassificatore. Tale sistema è in comodato d'uso con la ditta Rivoira SpA che ha provveduto ad effettuare le necessarie verifiche prima dell'avvio delle campagne sperimentali.

Valvole manuali e pneumatiche

Sono stati svolti test di funzionalità su tutte le valvole presenti nell'impianto sia manuali che pneumatiche (ON-OFF, regolazione). Da questi test si è potuto costatare che tutte le valvole necessitavano di adeguata revisione. Tali operazioni sono state svolte presso Sotacarbo e presso altre ditte e hanno richiesto in alcuni casi la sostituzione di parti quali maniglie di apertura, guarnizioni interne. Inoltre sono stati acquistati dei nuovi attuatori pneumatici. Le valvole revisionate sono state nuovamente testate prima di ogni avviamento.

Strumentazione impianto

Le strumentazioni sono composte da: misuratori di portata (rotametri, massici) misuratori di pressione, termocoppie, estensimetri, misuratori di livello. Tutti gli strumenti sono stati controllati e sottoposti a manutenzione. Inoltre è stato inserito un nuovo misuratore di portata per syngas posizionato all'uscita dello scrubber e prima della valvola rompifiamma della torcia in modo tale da misurare la quantità di syngas prodotta prima dell'invio a torcia.

Sistema di regolazione a controllo

Sul sistema di regolazione e controllo e sul sistema di acquisizione dati sono state effettuate delle verifiche funzionali, che hanno evidenziato alcune problematiche legate sia all'acquisizione dati ma anche alla gestione di qualche strumento (valvole pneumatiche, di regolazione, strumentazione in generale).

Tali inconvenienti sono stati risolti attraverso il controllo della trasmissione del segnale dai quadri del sistema di regolazione e controllo alle strumentazioni posizionate in impianto e la sostituzione di alcuni elementi del sistema di regolazione e controllo.

Prima dell'esecuzione dei test sperimentali è stato effettuato il collaudo funzionale di tutti i componenti del sistema suddetto, a seguito del quale si è reso necessario apportare alcune modifiche al software, quali:

- selezione dell'interblocco delle ghigliottine di carico;
- selezione dell'interblocco delle ghigliottine di scarico;
- blocco di soglia di alta temperatura sulle lampade di accensione;
- blocco del motore di rotazione dello stirrer in caso di elevato momento torcente;
- allarme sonoro in caso di spegnimento della torcia;
- allarme sonoro in caso di bassa portata sul ricircolo dello scrubber;
- allarme sonoro in caso di superamento della soglia di pressione in uscita al gassificatore.

Le elaborazioni relative alle attività tecnico scientifiche svolte nell'ambito del presente sottotema sono riportate nel rapporto RdS/PAR2013/277.

a.4 Sperimentazione presso impianto dimostrativo SOTACARBO

Nell'ambito del subtask in oggetto sono state eseguite delle prove funzionali su alcuni componenti dell'impianto dimostrativo per verificare e valutare gli interventi necessari per l'avviamento dello stesso. Alcune di tali attività erano state già avviate nella precedente annualità (PAR 2012), ma sono state rieseguite per predisporre l'impianto agli avviamenti effettuati in data 29-30.07.2014 e in data 16-17.09.2014, la cui durata complessiva è stata di 72 ore.

Di seguito si riporta una descrizione molto sintetica della sperimentazione effettuata al fine di valutare il processo di gassificazione con miscele di carbone Sulcis e cippato di legno. Le caratteristiche dei combustibili utilizzati

durante la campagna di sperimentazioni sono quelle riportate in Tabella 79. Modalità di prova e risultati ottenuti sono illustrati in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2013/278.

Prova del 29-30.07.2014

Sono state avviate le seguenti sezioni: gassificazione, scrubber e torcia. I principali obiettivi della prova sono stati:

- valutare le prestazioni del processo di gassificazione utilizzando una miscela di combustibili, quali: circa 81% di carbone Sulcis e circa 19% di cippato di legno (eucalyptus), aventi granulometria controllata (8÷15 mm) e caratterizzati da una densità apparente rispettivamente pari a circa 800 g/dm^3 e 220 g/dm^3;
- valutare la distribuzione delle temperature sulle pareti del gassificatore.

Sono stati analizzati i dati dei principali parametri operativi (portate, temperature e pressioni) e i dati sulla composizione del syngas rilevati dal gas cromatografo Agilent 3000 e dal sistema di analisi ABB, questi ultimi utilizzati per l'elaborazione dei grafici. In particolare è stato deciso di effettuare una interpolazione dei dati in quanto il sistema ABB rileva un numero elevato di valori per ogni presa di campionamento (circa 25000 campionamenti), con conseguente fluttuazione dei dati ottenuti. L'interpolazione ha permesso di ottenere una migliore presentazione dei grafici.

In alimentazione al gassificatore sono stati utilizzati 3.384 kg di carbone Sulcis e 792 kg di cippato, per un totale di 4.176 kg della miscela dei combustibili. Essendo il primo avviamento sull'impianto dimostrativo è stata programmata una durata massima di prova pari a 36 ore, per poter valutare il comportamento delle varie sezioni di impianto. Successivamente sarà necessario programmare avviamenti di maggiore durata (minimo 72 ore) per effettuare una corretta valutazione del processo di gassificazione, considerata la taglia dell'impianto.

Dall'analisi dei dati è emerso che il syngas prodotto presenta le seguenti caratteristiche: concentrazione di H_2 pari a circa il 9%, concentrazione di CO pari a circa il 20%, concentrazione di CO_2 pari a circa il 8%, un rapporto CO/CO_2 di circa 2,5 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H_2/CO pari a 0,45 kg_{H2}/kg_{CO}.

Prova del 16-17.09.2014

Sono state avviate le seguenti sezioni: gassificazione, scrubber e torcia. I principali obiettivi della prova sono stati:

- valutare le prestazioni del processo di gassificazione utilizzando una miscela di combustibili, quali: circa 75% di carbone Sulcis e circa 25% di cippato di legno (eucalyptus), aventi granulometria controllata (8÷15 mm) e caratterizzati da una densità apparente rispettivamente pari a circa 800 g/dm^3 e 220 g/dm^3;
- valutare la distribuzione delle temperature sulle pareti del gassificatore.

Anche in questo caso sono stati analizzati i dati dei principali parametri operativi (portate, temperature e pressioni) e i dati sulla composizione del syngas rilevati per via gascromatografica e dal sistema di analisi ABB.

In alimentazione al gassificatore sono stati utilizzati 2.625 kg di carbone Sulcis e 875 kg di cippato, per un totale di 3.500 kg della miscela dei combustibili. Anche questo secondo avviamento è stato programmato per una durata massima pari a 36 ore.

Dall'analisi dei dati è emerso che il syngas prodotto presenta le seguenti caratteristiche: concentrazione di H_2 pari a circa il 5,15%, concentrazione di CO pari a circa il 16,73%, concentrazione di CO_2 pari a circa il 9,47%, un rapporto CO/CO_2 di circa 1,76 kg_{CO}/kg_{CO2} ed un rapporto H_2/CO pari a 0,30 kg_{H2}/kg_{CO}.

I test sperimentali in generale sono stati positivi in quanto: i collaudi a caldo delle varie sezioni hanno avuto esito positivo, inoltre sono stati raccolti dei primi dati sperimentali, che hanno permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- Il gassificatore ha mantenuto durante tutto il test sperimentale (naturalmente si considera la sola fase di "regime") un profilo termico costante e tipico di un gassificatore a letto fisso up-draft;
- La qualità del syngas è stata buona con un potere calorifico inferiore di circa 4,2-4,5 MJ/kg;
- Il syngas prodotto si è dimostrato essere molto costante durante tutto il test sperimentale.

Tali indicazioni sono preliminari ed andranno verificate in ulteriori campagne sperimentali di maggiore durata. Comunque sulla base di questi risultati e delle principali problematiche emerse nel corso della campagna sperimentale è stato possibile definire quelle che possono essere le principali linee di ottimizzazione dell'impianto dimostrativo.

b. Cattura della CO_2 in ossi-combustione

L'attività si inserisce nel Protocollo di Intesa tra Regione Autonoma Sardegna (RAS) e MSE, nel quale si prevede lo sviluppo del "Polo Tecnologico per il Carbone Pulito" attraverso un programma pluriennale relativo allo sviluppo ed applicazione di tecnologie di cattura e sequestro della CO_2. Inoltre lo sviluppo di una tecnologia avanzata di ossi-combustione pressurizzata, con la realizzazione di un impianto pilota di potenza inferiore a 50 MWt.

b.1 Caratterizzazione del "coal slurry" di alimentare del reattore. Definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo da inviare alla sezione di trattamento fumi

Nell'ambito del presente subtask sono stati sviluppati una serie di studi preliminari alla realizzazione del progetto e di alcune delle apparecchiature che saranno successivamente installate nell'impianto pilota di ossi-combustione, tra le quali particolare interesse è dedicato alla sezione preliminare di studio di caratterizzazione delle correnti di input ed output al combustore ISOTHERM, che rappresenta l'elemento principale dell'impianto.
In questo ambito sono state individuate le principali caratteristiche delle miscele di acqua - carbone utilizzate in alimentazione, e la composizione degli effluenti gassosi dal sistema "reattore", la cui caratterizzazione è fondamentale per assicurare il corretto funzionamento delle unità a valle e per caratterizzarne la qualità ambientale.
Sulla base di quanto riportato in letteratura, e sull'ipotesi di alimentare il reattore con carbone Sulcis, sono state identificate le correnti in ingresso in regime stazionario (Tabella 84).

Tabella 84. Correnti in ingresso al reattore in regime stazionario

Corrente al reattore	Portata [kg/s]
Alimentazione slurry di cui:	2,68
carbone	1,74
acqua	0,94
Vapore (da turbina HTP)	0,18
O_2 (purezza 95%)	2,21

Nello stesso modo, è stata identificata la corrente in output e la sua relativa composizione nell'ipotesi di reazione completa di combustione, con lo zolfo completamente convertito in SO_2 e il tenore di O_2 nei fumi pari al 3% in volume (Tabella 85).

Tabella 85. correnti in ingresso al reattore in regime stazionario

Portata fumi di combustione [Nm^3/s]	4.47
Composizione fumi [%vol]	
CO_2	56
SO_2	2
H_2O	39
O_2	3

Riveste particolare importanza la preparazione dei combustibili in ingresso al reattore, ovvero la loro macinazione, che rientra nel processo di frantumazione che raggruppa un insieme di tecniche tendenti a ridurre il volume dei solidi.

Lo scopo fondamentale è quello di liberare il materiale utile dallo sterile, produrre materiali con dimensioni tali da avere una loro destinazione commerciale o ottenere un materiale le cui caratteristiche favoriscano lo svolgimento di operazioni industriali successive.

Nella preparazione delle miscele coal water (o slurry) è importante, al fine del raggiungimento delle condizioni ottimali di viscosità e stabilità in vista della massimizzazione della resa in carbone, il controllo sia del chimismo sia soprattutto della modalità di macinazione.

Tecnicamente, lo stadio di macinazione consiste nella riduzione dei prodotti provenienti dallo stadio di frantumazione terziaria (prodotti con dimensioni inferiori a 10 mm) o secondaria (prodotti con dimensioni inferiori a 25 mm) in grani di dimensione ancora più fini. Questa operazione prende il nome di polverizzazione se effettuata a secco con l'obiettivo di produrre elevate proporzioni di fini.

Precedentemente, nell'ambito della convenzione ENEA-DIGITA si era studiata la macinazione a secco nelle condizioni di bimodalità della distribuzione granulometrica. Poiché l'ambiente di frantumazione dei minerali (in aria o in acqua o in presenza di altri gas) determina una influenza non trascurabile sul comportamento della miscela, è stato chiesto al Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura dell'Università di Cagliari uno studio riguardante la macinazione ad umido utilizzando tecnologie innovative, basate sull'uso di getti ad acqua ad alta pressione in combinazione con energia meccanica.

L'obiettivo generale del lavoro è stato verificare l'efficacia dei getti di acqua sulla macinazione dei minerali. Nello specifico sono stati valutati e analizzati gli effetti della macinazione del carbone Sulcis proveniente dalla miniera di Nuraxi Figus. Il piano sperimentale ha compreso le fasi preliminari di preparazione del materiale, esecuzione delle prove al variare dei principali parametri operativi e analisi dei risultati ottenuti.

Per le prove sono stati utilizzati due prodotti aventi granulometrie differenti, una "fine" con dimensione inferiore ai 10 mm e l'altra "grossolana" con una dimensione inferiore ai 20 mm. Dopo la frantumazione, il materiale è stato suddiviso in campioni omogenei di uguale consistenza, per l'esecuzione delle singole prove consentendo, attraverso il confronto dei risultati, di individuare l'influenza delle variabili operative prese in considerazione nel piano sperimentale.

I parametri considerati per valutare la bontà della macinazione assistita da water jet utilizzando il mulino HERA progettato e costruito per la specifica applicazione sono stati:

- la pressione di generazione del getto;
- la dimensione e la portata degli ugelli;
- la potenza idraulica;
- l'energia specifica impiegata per unità di prodotto.

I prodotti ottenuti dalla macinazione sono stati sottoposti ad analisi granulometrica mediante l'utilizzo di vagli.

È stato effettuato un confronto tra i risultati ottenuti nelle diverse tipologie di prove, precisamente un primo confronto è stato fatto tra i risultati ottenuti dalla macinazione a secco e quella ad umido. Un secondo confronto ha riguardato gli effetti della pressione sulla macinazione ad umido. Un terzo confronto è stato fatto tra i risultati ottenuti dalla macinazione ad umido utilizzando un materiale secco ed uno preliminarmente imbevuto di acqua.

Si è potuto dimostrare che la macinazione assistita da water jet risulta essere più efficace rispetto alla macinazione a secco a parità di altre condizioni operative (tipo sistema di comminuzione, regolazione dei parametri geometrici e funzionali) perché si ottengono migliori gradi di finezza del materiale macinato con un grado di dispersione granulometrica significativamente minore.

È stato inoltre valutato l'effetto di pressioni crescenti sulla qualità del macinato. L'uso dei getti di acqua ad alta pressione inoltre fa aumentare considerevolmente le capacità di trattamento andando ad incidere positivamente sui costi di gestione, anche se, va considerato il consumo di energia elettrica per la generazione dei getti d'acqua (abbondantemente compensato dalla corrispondente riduzione dell'energia meccanica). Inoltre è stata riscontrata una limitazione dell'usura delle parti meccaniche del mulino per effetto dell'azione lubrificante dell'acqua.

Nello studio sono stati valutati inoltre i vantaggi sulla macinazione e sul grado di dispersione ottenibili utilizzando un materiale preliminarmente imbevuto di acqua.

Per le attività di ricerca sopra descritte sono state eseguite all'interno di una collaborazione con l'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura. Le attività tecnico scientifiche svolte nell'ambito del presente subtask sono riportate nei rapporti RdS/PAR2013/279 e RdS/PAR2013280.

b.2 Progettazione di una sezione di recupero di acido solforico da fumi di ossi-combustione

Sulla base delle considerazioni che porteranno alla realizzazione di un loop da banco ENEA, per la conversione degli ossidi di zolfo in acido solforico (rif. subtask b.2 delle attività del Polo Tecnologico - Parte B2, ENEA), sarà progettata da Sotacarbo una sezione di recupero di piccola taglia. Questa sarà dimensionata per trattare una quota parte della portata totale di fumi in uscita dal reattore. La fase di sperimentazione relativa, una volta realizzato la sezione, sarà effettuata (nel corso della prossima annualità PAR 2014) in maniera autonoma, prima ancora della sua installazione sull'impianto pilota a ossi-combustione pressurizzata, utilizzando flussi di gas simulanti la composizione dei gas di scarico dal reattore.
Nell'ambito del presente sottotema è stata effettuata la progettazione di base e di dettaglio di un impianto di piccola taglia per la conversione degli ossidi di zolfo (SO_2 e tracce di SO_3) presenti nei gas in acido solforico (H_2SO_4) di elevata purezza e alto valore commerciale. Tale attività è stata articolata come di seguito descritto.

Attività di studio teorico e preparazione

Sono stati effettuati i necessari approfondimenti teorici sul processo di conversione catalitica dell'SO_2 in SO_3 e sulla successiva conversione in acido solforico. Particolare attenzione è stata data all'individuazione:

- di catalizzatori commerciali e di nuova sintetizzazione;
- delle condizioni operative;
- della tipologia di reattore;
- delle criticità.

Progettazione della sezione di recupero dei composti solforati in scala pilota

Alla ditta Hysytech è stata affidata la progettazione della sezione di recupero degli ossidi di zolfo e produzione di acido solforico in scala pilota. In particolare l'impianto è progettato per abbattere sia fumi di scarico provenienti dal gassificatore pilota Sotacarbo (utilizzato come combustore) sia da miscele di gas che simulano i fumi prodotti da un ossi-combustore di tipo flameless (presumibilmente senza incombusti) e provenienti da una caldaia di recupero termico. A seguito delle prove di appoggio che si effettueranno presso gli impianti Sotacarbo, l'impianto verrà collegato all'impianto pilota di ossicombustione e in particolare verrà alimentato con una corrente spillata a valle del turboespansore posizionato dopo la caldaia, recuperando l'acido solforico dall'SO_2 contenuto nel gas.

Il processo consta di due fasi principali: durante la prima fase, l'alimentazione, dopo essere stata appositamente disidratata (il contenuto d'acqua è molto elevato e potrebbe compromettere la reazione che avviene sul catalizzatore), passa nel reattore catalitico nel quale avviene la conversione dell'anidride solforosa (SO_2) in anidride solforica (SO_3); durante la seconda fase, l'alimentazione disidratata e contenente ora SO_3 viene assorbita in una colonna contenente acqua, ottenendo quindi come prodotto l'acido solforico (H_2SO_4).

Durante la prima fase, si rende necessario l'uso di un catalizzatore per la reazione di conversione da SO_2 ad SO_3. Il platino rispetto ad altri catalizzatori ha temperatura di soglia minore (300 °C) e ciò, considerata l'esotermicità della reazione, spiega perché sia effettivamente da preferire ad altri catalizzatori. E' necessario, dopo la fase di disidratazione, un sistema di riscaldamento dei fluidi prima dell'ingresso al reattore catalitico per attivare la reazione alla temperatura desiderata.

L'obiettivo che si vuole raggiungere con tale impianto è la conversione dei composti solforati contenuti nei fumi in acido solforico concentrato al 98%.

L'alimentazione da trattare è inizialmente raffreddata in modo da far condensare e separare l'acqua presente nei fumi di combustione, e successivamente riscaldata prima di essere inviata al reattore catalitico che opera tra 300 e 400 °C. Durante questa fase si ha l'ossidazione di SO_2 in SO_3 e contemporaneamente una prima formazione di acido solforico per reazione di SO_3 con acqua.

Per incrementare il rendimento globale dell'impianto è previsto il recupero termico del calore dei fumi di combustione tramite uno scambiatore di calore che riscalda l'alimentazione disidratata.

Il reattore è dotato di due letti fissi catalitici; tra di essi la corrente di alimentazione è raffreddata in uno scambiatore che fa in modo che la temperatura all'interno del reattore non aumenti sfavorendo l'ossidazione dell'SO_2 in SO_3. Nella colonna di assorbimento l'acido prodotto grazie all'assorbimento di SO_3 in H_2O è fatto ricircolare all'interno della stessa tramite una pompa fino al raggiungimento della concentrazione desiderata.

I principali componenti che costituiscono l'impianto sono riportati nel seguito.

- *Reattore R-101*
  Il reattore R-101 è un reattore catalitico nel quale avviene la conversione di SO_2 in SO_3 e una prima formazione di acido solforico. Il catalizzatore utilizzato è il platino (Pt), data la sua temperatura di soglia bassa: esso funziona a partire da 300 °C. Altri catalizzatori, quali l'ossido di vanadio (V_2O_5) o l'ossido ferrico (Fe_2O_3) possono essere utilizzati, ma hanno temperature di soglia superiori (circa 400 e 500 °C rispettivamente), e ciò non è compatibile con la esotermicità della reazione. Il reattore sarà costituito da due strati di catalizzatore, tra i quali è posto un sistema di raffreddamento.
- *Scambiatore di calore (recupero termico) (E-101)*
  Tale scambiatore consente ai fumi di combustione (alimentazione) di raffreddarsi per far condensare e quindi separare la componente acquosa contenuta in essi, e contestualmente di recuperare tale calore per riscaldare la stessa corrente prima di entrare nel reattore, assicurando il raggiungimento della temperatura desiderata.
- *Scambiatore di calore (E-102)*
  Lo scambiatore di calore E-102 assicura il raggiungimento della temperatura di condensazione dell'acqua presente nei fumi di combustione.

- *Riscaldatore elettrico (E-103)*
  Il riscaldatore elettrico E-103 è usato in fase di start-up dell'impianto per riscaldare la corrente di alimentazione disidratata in ingresso al reattore.
- *Scambiatore di calore (E-104)*
  Lo scambiatore di calore E-104 è utilizzato per raffreddare la corrente di gas all'interno del reattore. Tramite esso la temperatura del reattore è mantenuta all'interno del range utile per la reazione di ossidazione della SO_2. Il controllo della temperatura, difficile da effettuare all'interno del reattore, è quindi effettuato sullo scambiatore E-103.
- *Colonna di assorbimento (C-201)*
  La colonna di assorbimento C-201 è una colonna batch in cui avviene la reazione di acidificazione a partire da SO_3 e H_2O. Tale colonna viene riempita d'acqua all'inizio del ciclo di lavoro dell'impianto e la corrente di fumi ossidati la attraversa: si ha la formazione di: acido solforico (dalla reazione tra SO_3 ed H_2O); CO_2 e O_2. L'acido prodotto come liquido viene raccolto sul fondo della colonna e ricircolato, in questo modo la quantità di acqua contenuta nella colonna diminuisce sempre di più e l'acido prodotto è sempre più concentrato fino ad un massimo del 98%.
  La temperatura all'interno della colonna è tale da favorire la reazione esotermica di acidificazione. Le correnti in uscita da essa, sia quella gassosa che quella liquida, hanno una temperatura di circa 50° C.

In Figura 259 si riporta il P&ID dell'impianto sopra descritto.

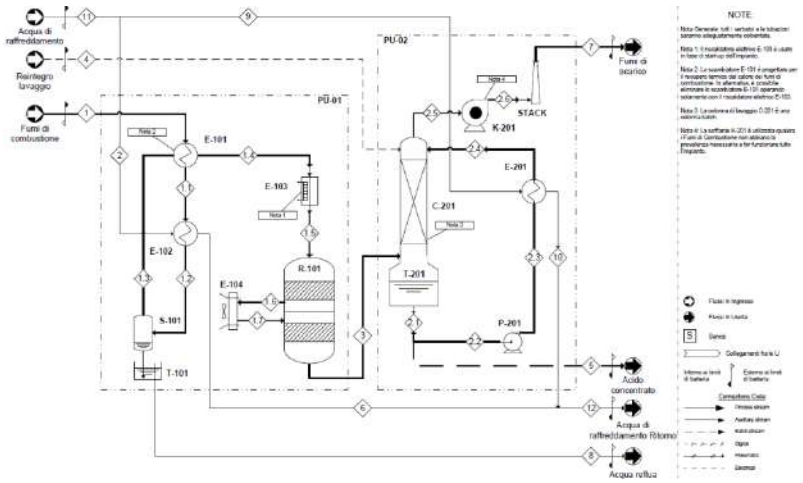


Figura 259. P&ID impianto di recupero di H_2SO_4

Le attività tecnico scientifiche svolte sono riportate nel rapporto RdS/PAR2013/281 e allegati.

c. Monitoraggio e storage della CO_2

L'area del Sulcis si presta molto bene allo stoccaggio dell'anidride carbonica in quanto è una zona non sismica e presenta formazioni acquifere saline, considerate le più idonee per lo stoccaggio della CO_2, sovrastate da strati di carbone non utilizzabili. Queste condizioni consentono di sperimentare contemporaneamente due differenti tecnologie: l'iniezione in acquiferi salini e lo stoccaggio in giacimenti non sfruttabili di carbone (ECBM, Enhanced Coal Bed Methane) con contemporanea estrazione del metano presente.

Altro elemento non trascurabile è l'assenza di forti ostilità sociali e politiche, trattandosi di un'area che storicamente ha impostato la sua attività economica sul carbone.

Indagini svolte da istituti di ricerca italiani e da altri paesi europei, membri di CO_2GeoNet (the European Network of Excellence for the Geological Storage of CO_2), hanno rilevato la presenza nel Sulcis di formazioni adatte al confinamento di quantità molto significative di anidride carbonica mediante le tecniche ECBM, in cui la CO_2 si fissa preferenzialmente alla matrice del carbone, spostando il metano, presente), e di iniezione negli acquiferi salini.

Il progetto si pone come obiettivo il completamento della caratterizzazione del bacino del Sulcis come potenziale sito di stoccaggio dell'anidride carbonica. Esso prevede indagini geofisiche e geochimiche, da superficie ed eventualmente in pozzo, per valutare le potenzialità del confinamento permanente della CO_2 negli strati profondi

e non coltivabili del bacino carbonifero, con tecniche ECBM, e nelle sottostanti formazioni acquifere, a una profondità superiore a 1200 m. Inoltre verrà valutata la possibilità di effettuare un'iniezione sperimentale di piccole quantità di CO_2 (non sufficienti a rappresentare potenziali fattori di rischio ambientale, ma piuttosto significative per valutare la sicurezza di un confinamento su grossa scala). Mediante i test sperimentali di confinamento potrà essere studiato il processo di diffusione della CO_2 all'interno del bacino carbonifero, che da studi preliminari risulta essere particolarmente adatto a una tale tipologia di confinamento, in virtù delle sue proprietà geologiche quali, tra le altre, la non sismicità della zona, la permeabilità del materiale e la presenza di un caprock che isola di fatto il giacimento impedendo eventuali risalite di CO_2.

Un'attenzione particolare merita il monitoraggio. Esso è essenziale per la selezione e la predisposizione di un sito di stoccaggio geologico dell'anidride carbonica. L'insieme degli studi dovrà fornire accanto alla prospezione dei gas del suolo finalizzata alla determinazione della "baseline", una mappatura geologico-strutturale dell'area ed un data-set completo da utilizzare per confronti puntuali con le misure effettuate successivamente. Tali misure, oltre a permettere di comprendere lo stato del sistema naturale in condizioni indisturbate, permetteranno di ottenere informazioni preziosissime da utilizzare in tutte le attività di coinvolgimento della popolazione locale. Tali studi dovranno interessare tutte le fasi del processo di stoccaggio (prima, durante e dopo l'iniezione di CO_2). Tale data-set sarà inoltre fondamentale per il successo delle attività mirate alla "public acceptance" del processo di stoccaggio geologico.

Tutto ciò premesso, nel PAR 2013 è prevista la ricostruzione e riorganizzazione del materiale di informazione esistente in merito alla geochimica nell'area del bacino del Sulcis, nonché analisi geo-simiche e caratterizzazione del baseline dell'area del bacino.

c.1 Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo geostrutturale

Nell'ambito del seguente subtask sono state svolte le attività che costituiscono la base per la realizzazione di un sito idoneo allo stoccaggio geologico della CO_2 prodotta dall'uomo (*Carbon Geological Sequestration* - CGS) nell'area del bacino del Sulcis. I primi studi effettuati negli anni precedenti da diversi enti di ricerca hanno infatti messo in luce le potenzialità del sito ai fini dello stoccaggio geologico, in particolare l'esistenza di acquiferi profondi (potenziali serbatoi per lo stoccaggio) sormontati da una coltre terrigena di copertura impermeabile con spessori superiori ai 400-500 m. All'interno della coltre di copertura si trovano, inoltre, letti di carbone che possono costituire una trappola secondaria per l'anidride carbonica in caso di un'eventuale migrazione della CO_2 immagazzinata verso la superficie. Tali caratteristiche renderebbero il sito non solo idoneo ma anche unico al mondo.
Gli studi effettuati hanno riguardato la raccolta delle informazioni attualmente disponibili sull'assetto geologico dell'area; una ricostruzione critica delle attività pregresse; i dati e i risultati del rilievo geologico-strutturale effettuato. Tali dati sono stati raccolti e sintetizzati in un ambiente 3D mediante il software Move della Midland Valley.

La zona in esame è stata ampiamente studiata nel passato per la presenza dei giacimenti di carbone contenuti all'interno dei depositi eocenici paleogenici. In generale, nella zona affiorano rocce che coprono un intervallo geologico piuttosto ampio, e che forniscono testimonianze di diverse fasi deformative, alcune delle quali ancora oggetto di diverse interpretazioni.

L'attività svolta ha riguardato la mappatura delle faglie e il rilevamento strutturale e ha previsto una revisione dei dati esistenti, basata sulle carte geologiche pubblicate e su una revisione in campagna dei dati regionali. E' stata inoltra svolta l'analisi della deformazione fragile e sono stati raccolti dati sulla fratturazione e fagliazione sulle rocce di copertura e del potenziale reservoir.

Per le faglie affioranti, dove possibile, sono stati misurati gli elementi della zona di faglia al fine di una classificazione qualitativa della distribuzione della permeabilità (densità di fratturazione vicino al piano di faglia, tipo di fratture, eventuali evidenze di circolazione di fluidi associati alla deformazione).

Per la fratturazione che interessa le rocce della copertura e del potenziale reservoir, sono stati eseguiti scan area e scan lines per un totale di circa 500 fratture (con relativi valori di spaziatura, lunghezza, apertura, etc.). Questa operazione è stata eseguita per le diverse litologie affioranti, e in particolare: Produttivo, F.ne Cixerri, Rioliti e Paleozoico - Calcari laminati.

L'analisi della fratturazione si propone di fornire una serie di parametri numerici statistici in grado di descrivere il pattern della fratturazione di un dato volume roccioso. Il lavoro che riguarda l'analisi della fratturazione è consistito in due parti: un rilievo in campagna e una fase di elaborazione dei dati. La fase di lavoro sul terreno comprende due tipi di procedure per la raccolta dei dati: la realizzazione di scan area e di scan line (Figura 260).

Una volta eseguito questo lavoro sul terreno, i dati raccolti sono stati quindi rielaborati per ottenere dei parametri statistici rappresentativi del sistema di fratture analizzato, che saranno utilizzati per generare il "*Discrete fracture network* (DFN)" all'interno del volume di roccia considerato. La rielaborazione e quindi la generazione del DFN è stata eseguita mediante l'utilizzo di software dedicati. Nel caso in esame è stato utilizzato il software Move, che permette di elaborare i dati di fratturazione e poi di ricavare i suddetti parametri. Tali operazioni si sviluppano in un apposito modulo del programma, chiamato Fratture Modelling, che contiene un workflow di modellazione automatizzato e consente la caratterizzazione della rete di fratture. Esso fornisce dei file utilizzabili direttamente per la simulazione di giacimento. Mediante l'integrazione completa con l'analisi strutturale e la modellazione, questo workflow fornisce la capacità necessaria per costruire e testare sistemi di fratture geologicamente validi, utilizzando un approccio statistico avanzato.

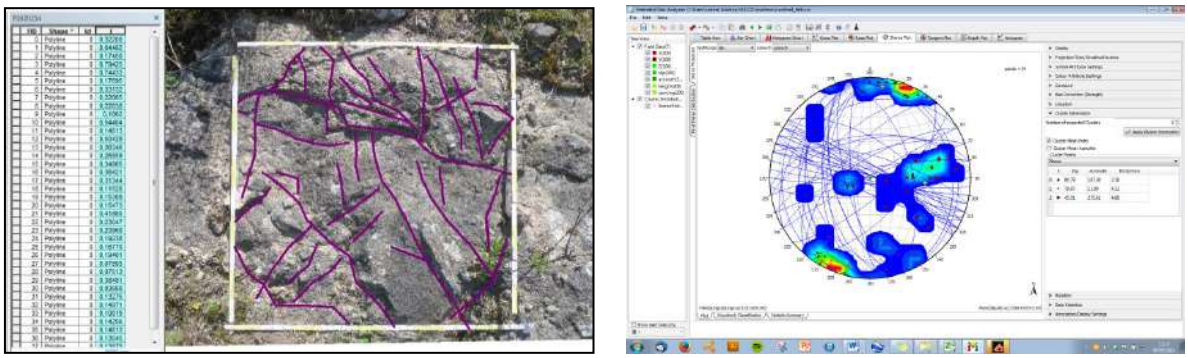


Figura 260. Scan area e scan line

In base ai dati presenti e delle osservazioni fatte durante le campagne di acquisizione dei dati, è stato ricostruito il piano delle principali faglie e il modello tridimensionale. Sono state inoltre individuate discrepanze tra i diversi tipi di dati, soprattutto per quanto riguarda la definizione degli spessori delle diverse formazioni nella zona sudorientale, che è poi quella con il potenziale maggiore per lo scopo di questa ricerca. Nell'ambito del presente sottotema sono state attivate collaborazioni con Carbosulcis**,** per il supporto alla caratterizzazione del bacino carbonifero del Sulcis, attraverso la raccolta e l'analisi dei dati pregressi e con l'Università di Roma " Sapienza" per la caratterizzazione geologico-strutturale del giacimento.

Le attività svolte nell'ambito del presente sottotema sono riportate nel rapporto RdS/PAR2013/282 e allegati.

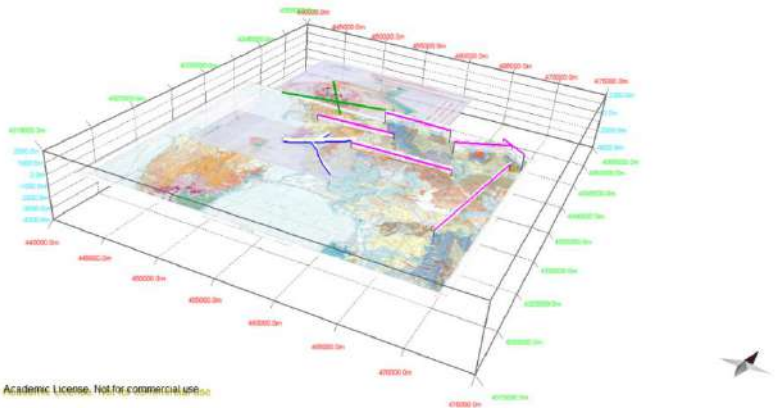


Figura 261. Elaborazione 3D area Sulcis

c.2 Procedure autorizzative, richieste concessioni per attività di ricerca e prospezione

Nell'ambito del presente subtask sono state raccolte le informazioni sul territorio in esame, per un maggiore grado di definizione del modello geologico dell'area, necessarie alla formulazione di ipotesi concrete di applicabilità dello storage. Sono state quindi richieste le autorizzazioni necessarie per l'accesso alla zona dove verranno effettuate le ricerche, installate le stazioni di raccolta, eseguiti i prelievi.

L'iter autorizzativo seguito è quello relativo alla concessione del permesso di ricerca di sostanze minerali, di competenza regionale. Per la Regione Autonoma della Sardegna, la competenza è dell'Assessorato all'Industria (settore Attività Estrattive) che rilascia il permesso previo parere favorevole del Servizio della Sostenibilità Ambientale, Valutazione Impatti e Sistemi Informativi Ambientali (SAVI) dell'Assessorato alla Difesa dell'Ambiente e previa intesa con i comuni territorialmente competenti, espressa in conformità con la pianificazione urbanistica comunale.

Il permesso è concesso fino a 3 anni rinnovabili fino a due, e per tale periodo permette al concessionario di eseguire tutte le indagini sull'area della concessione che si ritengano opportune per una più precisa individuazione del giacimento. Il permesso consente indagini geologiche e geofisiche sul terreno, anche di tipo invasivo, come sondaggi superficiali e profondi.

L'Assessorato all'Industria valuta il progetto sulla base degli elaborati presentati e i lavori previsti ed emette parere sulla concessione del permesso, eventualmente con imposizione di adempimenti da effettuare durante l'accantieramento o alla fine dei lavori. La concessione del permesso è subordinata al rilascio di parere favorevole da parte del Servizio di Valutazione dell'Assessorato all'Ambiente, che a seconda della tipologia del progetto e dell'entità dei lavori, valuta se esista la necessità di eseguire la Valutazione di Impatto Ambientale. Per il rilascio del nulla osta anche l'Assessorato Ambiente può richiedere eventuali adempimenti e prescrizioni da mettere in atto durante i lavori.

Il permesso di ricerca è stato richiesto per un'area di circa 5600 ettari (Figura 262), per combustibili solidi e acque termali, con denominazione "Monte Ulmus", per la durata di tre anni. Per il rilascio del permesso è stato presentato ad entrambi gli assessorati il progetto dettagliato e corredato di programma dei lavori, accompagnato da carte di riferimento e dalla relazione geologico-mineraria della zona.

Le attività tecnico-scientifiche svolte nell'ambito del subtask c.2 sono illustrate nel rapporto RdS/PAR2013/283.



Figura 262. Area della ricerca

c.3 Analisi geofisiche e caratterizzazione baseline dell'area del bacino del Sulcis

L'obiettivo del presente subtask è stato lo studio della sismicità di fondo dell'area carbonifera del Sulcis, attraverso la definizione della baseline della sismicità naturale dell'area. Tale baseline costituirà il principale riferimento per il successivo monitoraggio sismico di dettaglio dell'area oggetto del potenziale sito di stoccaggio, finalizzato a discriminare tra sismicità naturale e quella eventualmente dovuta a cause antropiche/industriali.

Inoltre, lo studio della sismicità di fondo potrebbe fornire indicazioni sulla presenza di faglie attive e contribuire alla loro caratterizzazione. A tal fine sarà eseguito un esperimento di acquisizione di dati sismologici con strumentazione installata nella zona del Sulcis ed in parte nel graben del Campidano.

La rete sismica installata è al momento costituita da 3 stazioni sismiche temporanee, poste nella parte settentrionale dell'area di studio. Ciascuna stazione (Figura 263) è costituita da strumentazione ad alta dinamica e sensibilità, con sensori a tre componenti che definiscono il moto del suolo nelle tre dimensioni.

Il carattere temporaneo delle stazioni sismiche, rispetto a quelle permanenti, è dato dal fatto che non vengono create, per l'installazione, opere infrastrutturali quali ad esempio pozzetti in cemento armato per alloggiare i sensori sismici, o platee dove installare pannelli fotovoltaici e/o sistemi di trasmissione satellitare o telefonica.

Ciascuna stazione temporanea è autoalimentata da batterie tampone ricaricate attraverso un pannello fotovoltaico di 2 m^2 circa di superficie. La registrazione dei dati avviene su supporti removibili posti all'interno dell'acquisitore, senza trasmissione dati ad un centro di raccolta.



Figura 263. Stazione sismica temporanea

Nell'ambito del presente subtask è stata attivata una collaborazione con l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, per lo studio del livello di sismicità naturale dell'area del Sulcis attraverso l'acquisizione di dati sismologici di alta qualità. Le attività tecnico scientifiche svolte sono riportate nel rapporto RdS/PAR2013/284.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Il ruolo attribuito alla Società Sotacarbo nell'ambito del Polo tecnologico per l'Energia pulita e i programmi ad esso connessi hanno determinato l'esigenza di un piano di comunicazione organico, capace di incidere positivamente sulla riuscita dei progetti, favorendone la comprensione e l'apprezzamento da parte dell'opinione pubblica.

Con l'obiettivo primo di migliorare la percezione esterna del lavoro svolto nell'ambito del progetto, si è cercato di approntare una strategia comunicativa che consentisse di portare esterno i risultati di maggior spessore e interesse.

La consueta produzione di pubblicazioni scientifiche è stata volutamente affiancata da una comunicazione divulgativa - su più livelli e in ambiti diversi - idonea a perseguire gli obiettivi di creazione e attrazione di interesse/ consenso a livello locale, regionale, nazionale e internazionale.

Per migliorare la propria capacità di informare e porsi come punto di riferimento sui temi legati all'energia pulita e alle tecnologie più avanzate in questo campo, Sotacarbo ha approntato diversi canali di informazione e formazione. Tra i primi vanno segnalati i siti web *sotacarbo.it* (in italiano) e *sotacarbo.com* (in inglese) e la testata digitale Only Natural Energy (ONE). Nell'ambito della formazione vanno invece evidenziate due iniziative: la Seconda edizione della "International Summer School on CCS Technologies" (14÷18 luglio 2014), rivolta a laureandi e laureati; il progetto Zero Emissioni (ZoE), che, rivolgendosi a studenti delle scuole superiori, completa il quadro dell'offerta formativa in un ambito di particolare interesse per l'azienda come le Carbon Capture and Storage (CCS).

In coerenza con la nuova strategia comunicativa, sono stati effettuati diversi cambiamenti anche nella gestione dei contenuti dell'accordo che regola l'appartenenza al IEA Clean Coal Centre, in qualità di rappresentante dell'Italia scelto dal Governo italiano. Tale partecipazione rappresenta un fiore all'occhiello per la Società e il Paese, pertanto sono state poste in essere varie attività per evidenziarla e farla conoscere all'esterno (tra l'altro organizzando incontro con autorità locali per spiegare ruolo dell'organizzazione e della Società al suo interno).

L'attività divulgativa svolta nell'ambito del presente subtask è illustrata nel rapporto RdS/PAR2013/285.

LINEA PROGETTUALE B2

Nella Linea Progettuale B2 vengono proposte ed affrontate tecnologie con un orizzonte applicativo nel breve-medio termine, che vengono applicate e studiate su facility di prova di ENEA., che è anche l'organo esecutore di riferimento della Linea. Oltre a ciò vengono condotte e descritte le azioni svolte da ENEA, come supporto alle attività di Sotacarbo, descritte nella Linea B1.

a. Tecnologie innovative per la cattura della CO_2 in pre-combustione, con produzione di combustibili gassosi e liquidi

Le attività trattate nell'Obiettivo afferiscono ai seguenti temi, cui fanno riferimento altrettanti subtask:

- processi di gassificazione e co-gassificazione avanzati finalizzati alla produzione di energia elettrica, con particolare riferimento allo sviluppo di sistemi di misura e controllo che assicurino un funzionamento stabile e continuo dei dispositivi, sviluppo di componenti innovativi, ottimizzazione energetica del processo di cattura, operata sul syngas, con solventi;
- produzione di SNG (Substitute Natural Gas) di qualità commerciale, da carbone, attraverso processi di idrogenazione di CO e CO_2, facendo anche ricorso a carboni nazionali di basso rango (Sulcis). Studio e caratterizzazione dei catalizzatori necessari e dei processi di trattamento del SNG, per purificarlo da tar e composti dello zolfo, e renderlo idoneo al suo utilizzo diretto;
- valutazione, su scala laboratorio e pilota, di tecnologie innovate per la produzione di combustibili liquidi (tecnologie CTL - Coal To Liquid e BTL – Biomass To Liquid) a partire da carboni di basso rango o da biomasse, eventualmente in co-gassificazione. Tali tecnologie saranno integrate con la cattura della CO_2.

a.1 Tecnologie avanzate di gassificazione presso impianto GESSYCA

Il subtask prevede la prosecuzione delle attività sperimentali avviate nel precedente PAR, legate allo sviluppo e caratterizzazione del processo di gassificazione e dei sistemi di separazione della CO_2 da syngas con ammine. Le attività sono state prevalentemente svolte presso ENEA, in parallelo a quelle condotte da Sotacarbo nel subtask a.1 (Parte B1, a responsabilità Sotacarbo) o come attività di supporto alle predette.

Nel dettaglio, l'attività sperimentale di gassificazione in oggetto è stata condotta presso l'impianto GESSYCA (GEneratore Sperimentale di SYngas da Carbone di ENEA-C.R.Casaccia, messo a punto nel precedente PAR.

L'impianto è dotato dei componenti base di un impianto di gassificazione più complesso. In particolare esso è equipaggiato di un gassificatore a letto fisso in grado di operare in continuo, di uno scrubber per la pulizia del syngas, di un reattore di desolforazione, di un reattore di shift, di tre reattori di metanazione che effettuano la conversione del syngas in gas naturale sintetico e di una torcia di smaltimento del gas prodotto. L'intero impianto è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei principali parametri operativi che consente il monitoraggio del processo da remoto.

Date le piccole dimensioni, l'impianto è caratterizzato, rispetto all'impianto Pilota di Sotacarbo, da una maggiore versatilità e flessibilità di uso, ed è caratterizzato da una griglia di tipo innovativo.

L'impianto presenta inoltre i vantaggi di essere allocato su skid mobile (Figura 264), e di poter essere alimentato con differenti tipologie di combustibile (carbone e/o biomasse). Inoltre, essendo dotato di una sezione di conversione catalitica, GESSYCA offre la possibilità di testare nuovi processi di conversione del syngas in prodotti a maggiore valore aggiunto.



Figura 264. Impianto di produzione di gas sintetico GESSYCA e immagine termografica della torcia

L'obiettivo delle attività sperimentali condotte sul mini impianto è stato quello di testare le modalità di esercizio per il miglioramento del processo di produzione di syngas, nonché di testare strumentazione atta al suo controllo.

In particolare le attività si sono sviluppate focalizzando l'attenzione sulla qualità del syngas prodotto, alla luce in particolare degli interventi migliorativi introdotti sul gassificatore di tipo up-draft, e sul definire le modalità di conduzione dell'impianto, attraverso l'utilizzo di strumentazione e analitica di supporto al controllo di impianto. I primi test a caldo hanno visto l'accensione del gassificatore e una prima verifica di tutta la componentistica e dei sistemi di misura. Sono state valutate le prestazioni del processo di gassificazione e la reattività dei vari combustibili.

Sono poi proseguite le attività di coordinamento e collaborazione alla sperimentazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo, a supporto dei "Test di gassificazione presso la piattaforma pilota Sotacarbo" e di quelli "di separazione della CO_2 da syngas" (Subtask a.1 e a.2, Attività Polo Tecnologico-Parte B1, a responsabilità Sotacarbo) .

In particolare si è dato corso ad un'attività di monitoraggio del processo di gassificazione. Infatti al fine di avere una migliorata mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore si è proceduto con l'installazione di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica (Figura 265).

Tra i primi risultati si è riscontrata una dinamica più rapida per il sistema con le termocoppie in parete, inoltre è degno di nota il fatto che i profili termici ricavati danno un'informazione anche in senso radiale, in caso di avarie si ha una maggior ridondanza dei dati sui diversi piani ed anche la sostituzione di un singolo sensore è possibile senza operazioni troppo dispendiose o che comportino la fermata dell'impianto.

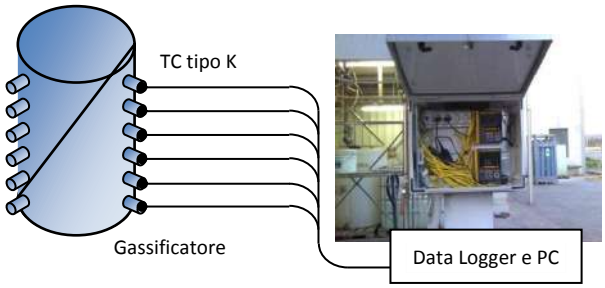


Figura 265. Impianto Piattaforma Pilota: schema disposizione sensori TC

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri rimane da un lato la necessità di concludere parte dei lavori di modifica e realizzazione delle nuove sezioni e dall'altro quella di proseguire l'ottimizzazione con sperimentazioni volte a integrare gli aspetti operativi delle varie sezioni, garantire l'accuratezza delle misure effettuate e approfondire le conoscenze relative alle sezioni di recente acquisizione.

L'attività è descritta nel rapporto RdS/PAR2013/294.

a.2 Partecipazione alle attività di progettazione delle modifiche all'impianto dimostrativo SOTACARBO per co-gassificazione di carbone e biomasse

Con riferimento ai Subtask a.3 e a.4 Attività Polo Tecnologico (Parte B1, a responsabilità Sotacarbo), riguardanti l'adattamento dell'impianto "dimostrativo" di gassificazione e l'effettuazione di test di co-gassificazione di carbone e biomasse, ENEA ha curato direttamente o partecipato ad una parte significativa delle attività [rapporto RdS/PAR2013/277].

Nel dettaglio l'attività ha riguardato l'adattamento e la sperimentazione dell'impianto di gassificazione "Dimostrativo da 5 MWt", già presente presso il Centro Ricerche Sotacarbo, per l'effettuazione di test di co-gassificazione di carbone e biomasse da filiera corta (come il cippato), con produzione di un syngas da impiegarsi per la generazione elettrica. L'obiettivo dichiarato per il futuro è quello di effettuare, a valle di questa prima fase di test, tutte le modifiche necessarie per la produzione in continuo di energia elettrica da immettere in rete.

L'obiettivo è consistito nel modificare l'impianto dimostrativo (comprendente un gassificatore a letto fisso up-draft da 5 MWt e gli ausiliari), al fine di renderlo adatto al funzionamento in continuo per generazione elettrica da biomasse (cippato di legno) miscelate con carbone. In particolare ENEA ha curato, la progettazione delle modifiche della griglia di supporto del letto combustibile, sulla base anche delle esperienze condotte sull'impianto GESSYCA, al fine di consentire il funzionamento in continuo dell'apparecchiatura con miscela di biomasse e carbone. Ha poi seguito le attività di commissioning dando il suo contributo sul test di sistemi e componenti (p.es. sistema di movimentazione dello stirrer e su quello di raffreddamento del water jacket), sulla ri-taratura di parte della sensoristica ed il test di tutta la strumentazione e dei sistemi ausiliari al fine di consentire i primi test sperimentali a caldo.

Il sistema modificato è composto da un cono di scarico ceneri contenete un griglia mobile movimentata da un motore che ne consente la rotazione in entrambe i versi (figura 266). Lo scarico delle ceneri dal gassificatore è completato da due ghigliottine che aprendosi alternativamente permettono la fuoriuscita delle ceneri. Il problema

principale riscontrato prima delle modifiche era relativo al deposito di materiale solido fra le dentature del pignone e della corona occorso durante lo scarico delle ceneri con conseguente blocco del sistema e danneggiamento della superficie dei denti. Per verificare le condizioni della griglia si è proceduto allo smontaggio del cono e della griglia di scarico ceneri con l'ausilio di una ditta specializzata. Da una prima verifica della griglia e del sistema di movimentazione si è riscontrato che le problematiche di funzionamento del sistema erano imputabili ad un'errata progettazione.

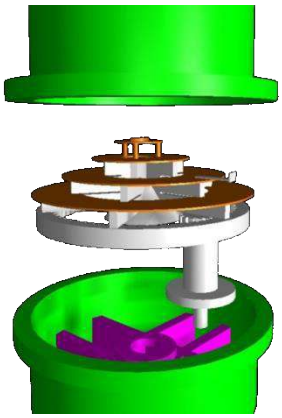


Figura 266. Dettaglio della griglia rotante

Tutto il sistema di scarico è stato portato in un'officina attrezzata, dove si è proceduto al completo disassemblaggio, alla sabbiatura ed al rilievo delle misure dei vari componenti Durante le verifiche, è stato riscontrato poi un problema relativo al piegamento dell'albero del pignone, dovuto all'accumulo, non previsto, del materiale solido all'interno dell'alloggiamento del pignone.

Il sistema è stato rivisto e sono state apportate alcune modifiche progettate congiuntamente dai tecnici ENEA e Sotacarbo, in particolare:

- sono state realizzate delle aperture nella struttura di sostegno della griglia e del pignone che hanno permesso il deflusso del materiale solido presente nel vano pignone;
- sono stati realizzati dei raschiatori che, ruotando insieme al pignone, hanno impedito la formazione di cumuli di materiale di scarico fra pignone e corona;
- è stato modificato l'interasse pignone corona su progetto ENEA-Sotacarbo.

A valle di ciò sulla base degli studi di processo e dell'esperienza maturata in passato, sono state predisposte, di concerto con Sotacarbo, le procedure operative sia per la fase di startup che per quella di sperimentazione e spegnimento anche sulla base di quelle elaborate da Ansaldo Ricerche in sede di realizzazione dell'impianto della Piattaforma Pilota a partire dal 2008. La durata delle prova è stata fissata in 36 h ripartite in tre turni da 12 h.

Il principale obiettivo delle prove è stato quello di testare tutto l'impianto ed in particolare:

- sistema di caricamento del combustibile (paranco, ghigliottine di carico e tramoggia);
- sistema di movimentazione del letto (stirrer);
- sistema di monitoraggio delle temperature in parete (termocoppie);
- sistema di accensione (irradiatori ceramici, con modifica della carica di startup e dell'inerte);
- sistema di scarico ceneri (ghigliottine di scarico, griglia mobile e motoriduttore);
- sistema di raffreddamento del gassificatore (water jacket, circuito condensatore modificato);
- sistema di generazione e adduzione del vapore ausiliario;
- sistema aria processo (soffiante, misuratori di portata, valvole di regolazione);
- sistema di clean up (scrubber, pompe di ricircolo, scarico reflui, protezione dalle sovrapressioni);
- torcia (test valvola rompifiamma, misurazione portata GPL, controllo temperatura);
- sistema di analisi gas (punti di prelievo, filtri, linee di campionamento, analizzatori);
- sistema di acquisizione e controllo (consolle, quadri, sensoristica e attuatori, misuratore Qs ritarato).

E' stata utilizzata in alimento una miscela di carbone Sulcis e cippato nella proporzione 75/25 in peso. E' stata in parte utilizzata la misura della composizione del syngas prodotto per la corretta gestione dell'impianto e per valutare le prestazioni di impianto al variare dei parametri di processo.

In modalità operativa sono state utilizzate le seguenti macro sezioni di impianto: gassificatore, scrubber, torcia e sistemi ausiliari.

La fase di caricamento a freddo è stata effettuata con i materiali di seguito elencati e assumendo la quota della griglia periferica come zero delle altezze:

-	Pietrame	40 cm	circa 500 L	circa 1500 kg

a valle di questo primo caricamento è stato effettuato un test di rotazione della griglia, un test di rotazione/ traslazione dello stirrer.

-	Cippato di pino	30 cm	circa 500 L	circa 250 kg
-	Mix carbone Sulcis/cippato	650 cm	circa 870 L	circa 500 kg.

A valle del primo caricamento del combustibile e dei check degli ausiliari aria strumenti, aria processo, GPL, azoto, analitica e livelli reflui vasche, pozzetti e funzionalità pompe si è proceduto nell'ordine seguente:

1. Avvio analitica
2. Avvio caldaie vapore
3. Riscaldamento lampade IR
4. Avviamento scrubber e controllo livelli
5. Accensione torcia
6. Riempimento camicia water jacket e controllo livello steam drum (ritarato a monte della prova)
7. Avvio sistema di raffreddamento stirrer con verifica portata acqua
8. Invio aria alle lampade di startup
9. Verifica temperatura TC in parete
10. Verifica temperatura acqua camicia water jacket e check livello steam drum con reintegro acqua
11. Avvio aria sotto griglia
12. Check fumosità vent
13. Blocco aria lampade
14. Invio aria sotto griglia
15. Verifica analitica (in particolare CO, CO_2 e O_2)
16. Regolazione aria sotto griglia in base alle TC ed all'analitica
17. nuovo caricamento mix carbone/cippato
19. Invio vapore on
20. Controllo circuito di condensazione, livelli, temperature e portate
21. Avvio motori ventole aerotermi.

Un volta pervenuti allo stato "stazionario" il controllo si è concentrato sui seguenti punti:

- avvio movimentazione griglia
- aria sottogriglia circa 500 kg/h
- vapore circa 50 kg/h
- carbone/cippato circa 350 kg/h
- scarico ceneri circa 50 kg/h
- livello letto compreso tra 1500 e 2300 mm)
- livello steam drum circa 210 mm
- portata syngas
- campionamento syngas
- composizione syngas
- portata condensatore

Per la fase di spegnimento è stato interrotto ogni tipo di caricamento e l'invio di vapore mentre l'invio aria sottogriglia è stato parzializzato. Lo scarico completo del materiale è stato abbastanza lento.

La sperimentazione ha visto due test di co-gassificazione a caldo di durata complessiva pari a 72 ore effettuati in data 29-30 Luglio (Figura 267) e 16-17 Settembre 2014. E' da sottolineare che l'impianto in questione non era mai stato testato (un tentativo di accensione è stato effettuato nel 2009) a causa di problematiche presenti sul sistema di scarico ceneri.



Figura 267. Operazioni in impianto durante l'avviamento a caldo del 29 e 30 luglio 2014

La campagna sperimentale sul processo di gassificazione è stata programmata ed effettuata al fine di collaudare a caldo le varie sezioni dell'impianto dimostrativo e di migliorare ed aumentare le conoscenze del processo di

gassificazione operando su un impianto di dimensioni significative e taglia nominale pari a 5 MWt. I risultati delle prove sperimentali eseguite sono stati descritti nel paragrafo relativo al subtask a.4 della linea progettuale B1.

a.3 Sperimentazione relativa alla produzione SNG da CO e CO_2: metodi innovativi per la purificazione dal TAR e sintesi di nuovi catalizzatori

La produzione di SNG (Substitute Natural Gas) da carbone mediante il processo di metanazione, presenta il vantaggio di ottenere un gas immediatamente collocabile sul mercato della distribuzione verso gli usi finali, senza richiedere ulteriori sezioni di raffinazione. Tuttavia il processo richiede ancora importanti innovazioni e sviluppi in campo tecnico in termini di miglioramento dell'efficienza energetica e minimizzazione dell'impatto ambientale. Il fine è quello di migliorare la competitività economica rispetto ai competitors (gas naturale e GPL) e ridurre l'utilizzo di "materie prime" ed energia. Nel contesto italiano lo studio di una possibile applicazione di questo genere avrebbe poi l'importante e ulteriore ricaduta di un impiego massiccio di carboni nazionali di basso rango (Sulcis).

In questo ambito sono state svolte attività relative a più aspetti. La prima linea di attività ha visto un'analisi, con l'ausilio di un codice commerciale di simulazione impiantistica, di due diverse configurazioni impiantistiche del processo SNG, entrambe integrate con tecnologie Carbon Capture and Storage Technology (CCS). Per entrambe le configurazioni impiantistiche, si è valutato il rendimento e stimata la penalizzazione energetica causata dalla adozione di tecnologie di cattura della CO_2.

La prima configurazione (caso A) realizza la rimozione della CO_2 prima del reattore di metanazione e la reazione viene condotta in una serie di reattori adiabatici a letto fisso con inter-raffreddamento e riciclo del prodotto. La seconda configurazione (caso B) prevede una sezione di metanazione dove grazie alla diluizione del gas di alimentazione con CO_2 e vapore d'acqua è possibile controllare il calore sviluppato. In questo caso la CO_2 viene catturata a valle del processo. Se l'impianto è equipaggiato di tecnologia CCS, in entrambi i casi, la CO_2 è catturata compressa, trasportata e stoccata ad esempio in giacimenti di carbone o falde acquifere sottostanti.

La configurazione dei due impianti differisce principalmente nella sezione di metanazione e nella presenza di due sezioni di rimozione dei gas acidi nel caso B. Uno schema generale dei principali blocchi del processo di SNG, per il caso A e caso B, è riportato in Figura 268.

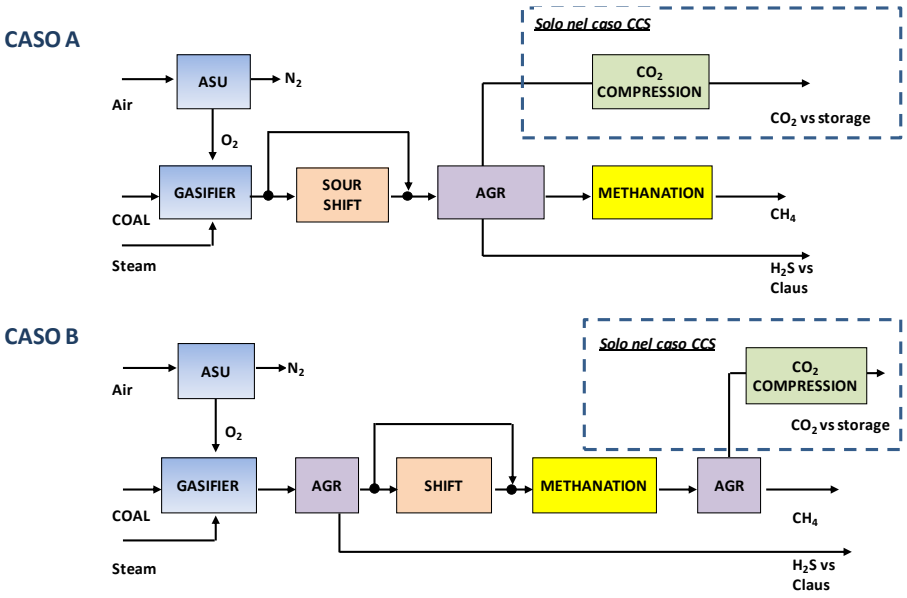


Figura 268. Schema a blocchi delle due configurazioni di impianto SNG analizzate

I risultati (Figura 269) indicano una produzione di circa 81400 Nm^3/h di SNG (circa 767 MWth) per una alimentazione di 4500 t/giorno di carbone con rese energetiche complessive del 50 % che scendono al 49 % nel caso di cattura della CO_2. L'integrazione con la sezione di cattura determina un leggero decremento della resa complessiva, a sottolineare la stretta integrazione tra tecnologia SNG e tecnologie CCS. Infine i risultati del modello sviluppato con il codice risultano in buon accordo con quanto sviluppato in letteratura.

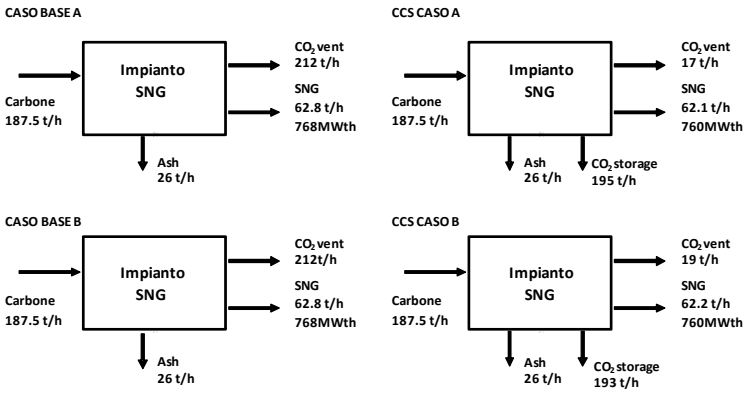


Figura 269. Risultati schematici del Caso A e B con e senza CCS

Relativamente alle due configurazione si evidenziano prestazioni e rese in metano similari. Con maggiore dettaglio, il caso A mostra una maggiore produzione di vapore nella sezione di metanazione ma presenta lo svantaggio di una maggiore spesa energetica del compressore di ricircolo. Viceversa il caso B presenta due sezioni di rimozione dei gas acidi ma temperature di esercizio dei reattori di metanazione più moderate con una conseguente salvaguardia maggiore rispetto al caso A dei materiali e dei catalizzatori.
Va indicato che la presente analisi pone le basi per un successiva valutazione dei costi necessari alla produzione di un metro cubo di SNG a partire dal carbone nelle due configurazioni analizzati al fine di confrontarlo con il valore di costo di mercato ed individuarne la taglia ottimale per una sua convenienza

Il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente, dell'Università di Roma La Sapienza, nell'ambito di questo subask, ha svolto un'attività relativa allo sviluppo di metodi innovativi per la purificazione del gas dal suo contenuto in tar.

Le attività effettuate riguardano l'ottimizzazione della qualità del syngas prodotto mediante gassificazione del carbone, in particolare riguardo alla riduzione del contenuto di tar. La purificazione del syngas rappresenta uno degli aspetti più critici della gassificazione di carboni e biomasse. Gli inquinanti presenti nel syngas sono, infatti, dannosi sia per l'ambiente sia per tutte le apparecchiature e le linee successive al reattore di gassificazione. In particolare il tar, contenuto allo stato di vapore nel syngas, può condensare nelle zone dell'impianto in cui la temperatura scende al di sotto del punto di rugiada dei composti organici che lo costituiscono, provocando sporcamento ed ostruzione di apparecchiature, tubazioni, filtri, nonché danneggiamento delle turbine. Il tar, inoltre, costituisce un veleno per i catalizzatori usati nei processi di sintesi. Bisogna poi considerare che nel tar sono contenute sostanze cancerogene: la sua rimozione è pertanto necessaria anche per questioni connesse alla tutela dell'ambiente e della salute umana.



Figura 270. Reattore di pirolisi e gassificazione

Allo scopo di assicurare un efficace abbattimento della concentrazione di tar nel syngas è stato sviluppato e testato un impianto di gassificazione innovativo basato sulle tecnologie di gassificazione più comunemente utilizzate quali quelle dei reattori up-draft e down-draft.

L'impianto su scala di laboratorio (Figura 270) è costituito da un reattore di gassificazione diviso in due stadi, uno stadio di pirolisi e uno di gassificazione del char, che permettono di rendere il processo autotermico, seguito da un reattore di reforming catalitico che assicura la decomposizione del tar in prodotti leggeri.

L'abbattimento del tar viene effettuato in due step, un primo stadio di abbattimento avviene direttamente nel reattore di pirolisi, facendo passare i gas attraverso un letto di char, e poi l'ultima fase di decomposizione del tar avviene nello stadio di reforming, dove sono stati utilizzati catalizzatori a base Ni-Co/Ce supportati su Al_2O_3. Si ottiene così un abbattimento del 90% che corrisponde ad una percentuale di tar in uscita con il syngas di circa il 2% in peso rispetto alla biomassa alimentata. Entrambe le configurazioni testate per il reattore di gassificazione, una di tipo up-draft e l'altra di tipo down-draft, permettono di ottenere buoni risultati, producendo un syngas

costituito per oltre il 70% da CO e H_2. Inoltre si è dimostrato che in entrambe le configurazioni è possibile operare in regime autotermico; nel reattore di tipo up-draft il calore necessario alle reazioni endotermiche di gassificazione viene fornito dalla reazione di combustione del char, mentre nel reattore di tipo down-draft l'energia necessaria vene fornita dalla combustione di parte dei gas di pirolisi che permette il raggiungimento di temperature di circa 1000 °C nel letto di gassificazione.

Sempre nell'ambito di questo subtask, il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, dell'Università di Cagliari ha sviluppato, sintetizzato e testato in laboratorio un nuovo catalizzatore per la sintesi del metano da CO_2, caratterizzato da prestazioni (efficienza) superiori.

L'attività ha visto la sintesi di due classi di ossidi nanostrutturati, il primo costituito da NiO puro e da campioni NiO CeO_2 (NiCe) ed il secondo costituito da campioni NiO-Fe_2O_3 (NiFe) mediante una procedura non convenzionale denominata "hard template", utilizzando come templante "hard" la silice mesostrutturata SBA-15. Sono stati inoltre sintetizzati due campioni NiO-Al_2O_3 (NiAl), depositando il nichel per impregnazione su γ-allumina commerciale. I campioni sono stati caratterizzati in relazione alla loro composizione chimica, struttura, tessitura e caratteristiche ossido-riducenti tramite spettroscopia di emissione al plasma ad accoppiamento induttivo (ICP-AES), diffrazione di raggi X, adsorbimento fisico di N_2 e riduzione a temperatura programmata con idrogeno (H_2-TPR). L'attività catalitica di tutti i campioni preparati è stata testata nella reazione di idrogenazione di CO_2 a CH_4, condotta a pressione atmosferica e alla temperatura di 300 °C, con un rapporto molare H_2/CO = 4. I catalizzatori della serie NiO CeO_2 sono risultati essere materiali mesoporosi nanostrutturati, repliche negative della silice utilizzata come templante, e hanno mostrato di possedere valori di area superficiale apprezzabilmente superiori a quelli di materiali analoghi ottenuti mediante procedure di sintesi convenzionali. I catalizzatori della serie NiO Fe_2O_3 sono invece risultati essere materiali mesoporosi più disordinati, con valori di area superficiale significativamente più basse rispetto alla serie precedente.

I risultati catalitici hanno messo in evidenza le elevate prestazioni dei catalizzatori della serie NiCe (Figura 271), che hanno mostrato una conversione di $CO_2 \geq 60$ mol% per tutta la durata della prova, per contenuti di Ni intorno al 20% in peso (corrispondenti a valori del rapporto molare Ni/Ce vicini all'unità). Tali valori di conversione sono risultati molto maggiori di quelli ottenuti sui catalizzatori del sistema convenzionale NiAl. La sostituzione della ceria con l'ossido di ferro ha influenzato negativamente l'attività catalitica; sui campioni della serie NiFe è stato infatti osservato un marcato fenomeno di disattivazione, dovuto alla formazione di residui carboniosi superficiali.

I risultati di tutta l'attività sono illustrati nel rapporto RdS/PAR2013/263.

Per la successiva sperimentazione dei processi su scala ridotta (attività PAR 2014), verrà completata la realizzazione della facility di prova GESSYCA di ENEA.

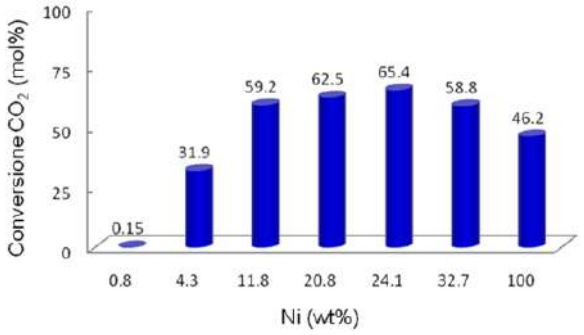


Figura 271 . Conversione di CO_2 in funzione del contenuto di Ni per NiO e per i campioni della serie NiCe(x). T_R=300 °C; H_2:CO_2= 4,3 mol/mol; $m_{ctz.}$ = 0,05 g; GHSV = 72000 mL $h^{-1}g^{-1}$

a.4 Tecnologie Coal and Biomass to Liquid: Analisi energetiche di processo e indagini sperimentali per lo sviluppo di nuovi catalizzatori della sintesi Fischer-Tropsch

La presente attività ha avuto lo scopo di studiare la fattibilità tecnico-economica di un impianto di produzione di benzina e GPL, integrato con tecnologie CCS, utilizzando come materia prima carbone e biomassa e producendo metanolo come intermedio di reazione. L'alimentazione mista biomassa e carbone ha permesso di analizzare un impianto ad emissioni di CO_2 quasi nulle. In quanto l'utilizzo della biomassa ha consentito la compensazione della CO_2 emessa dalla benzina durante il suo ciclo di vita come combustibile. Pertanto il presente studio analizza dal punto di vista energetico ed economico uno specifico processo di produzione di combustibili liquidi a partire dal carbone attraverso il processo MTG, ovvero methanol to gasoline, integrato con tecnologie di cattura della CO_2. Di tale impianto si sono stimate le prestazioni in termini di rendimento sia nel caso della sua integrazione con le tecnologie CCS che in assenza della cattura della CO_2. Si sono studiate due configurazioni (Figura 272): la prima prevede la sola alimentazione dell'impianto con carbone e la seconda un'alimentazione con carbone e biomassa.

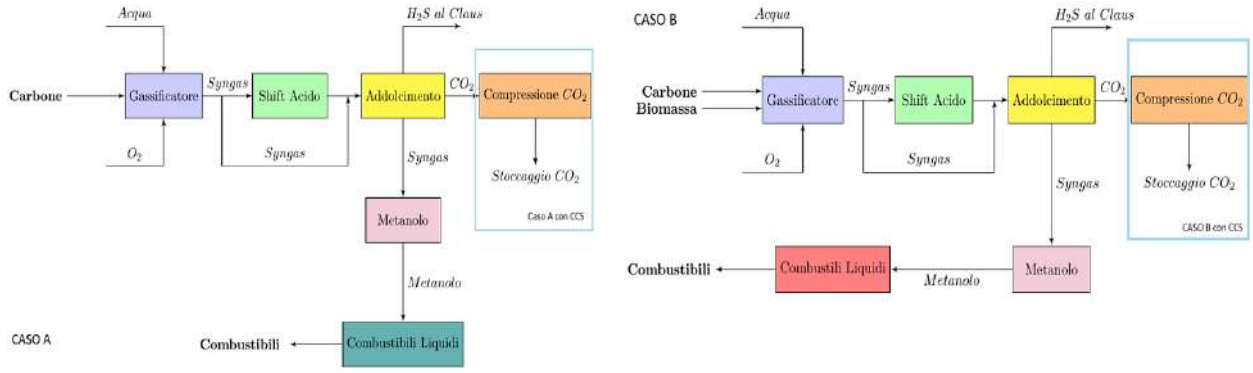


Figura 272. Schema a blocchi dei due impianti

L'elaborazione è stata condotta con l'ausilio del codice di simulazione Aspen Plus che ha permesso di ottimizzare il processo e di valutare le prestazioni dell'impianto con bilanci in massa ed energia.

Parallelamente l'obiettivo del lavoro di ricerca è stato l'integrazione, all'interno delle configurazioni individuate, delle diverse sezioni impiantistiche attraverso l'adozione di soluzioni che assicurino più elevati valori di efficienza energetica e quindi costi minori. Il fine ultimo è stato quello di valutare le potenzialità dell'impianto individuato in modo da ottimizzare dal punto di vista energetico il processo. Le tecnologie individuate per le singole sezioni dell'impianto sono quelle che risultano più diffuse commercialmente per questa tipologia di processo. Sono state condotte le analisi energetiche relative ad ogni casistica studiata e si è comparato il risultati.

I risultati (Figura 273) indicano una produzione di circa 11000 bbl/giorno di benzina e di circa 2000 bbl/giorno di GPL per una alimentazione di 5000 t/giorno di carbone con rese energetiche complessive del 40% che scendono al 38% nel caso di cattura della CO_2. Nel caso di co-alimentazione di carbone e biomassa si hanno rese minori in termini di produzione di benzine ovvero 1,7 bbl/t di carbone e biomassa alimentati. Relativamente alla distribuzione degli carico degli ausiliari la sezione ASU e la sezione di refrigerazione risultano le più energivore.

Si è completato lo studio con un'analisi economica che confrontasse i prezzi finali dei combustibili liquidi, ricavati dalle quattro soluzioni impiantistiche studiate, con il prezzo odierno della benzina di raffineria. I risultati calcolati al netto delle imposte, evidenziano come il prezzo di un litro di benzina al break even point risulti compreso nell'intervallo 0,58-0,96 €/L.

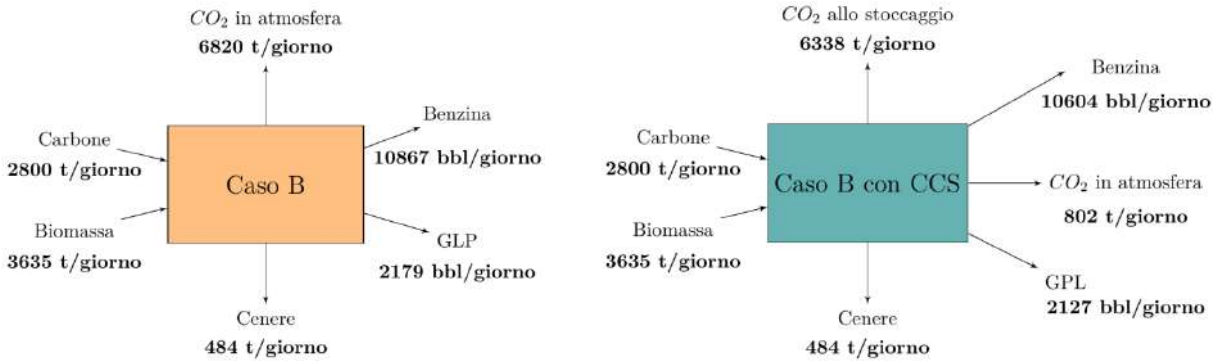


Figura 273. Principali risultati della configurazione impiantistica alimentata con carbone e biomasse con e senza CCS

Nell'ambito del medesimo obiettivo il Laboratorio di Catalisi e Processi Catalitici del Politecnico di Milano ha condotto un'attività di l'analisi e sperimentazione del processo di produzione di combustibili liquidi e gassosi da carbone tramite il processo Fischer-Tropsch con riutilizzo della CO_2. Nello specifico l'attività è stata focalizzata sulla sintesi di Fischer-Tropsch (FT) condotta su catalizzatori a base di ferro, opzione identificata come via di particolare interesse per la conversione del gas di sintesi derivante da gassificazione del carbone del Sulcis.

L'attività si è articolata in più linee, la prima delle quali ha riguardato la preparazione e la caratterizzazione di catalizzatori a base di ferro con diversi tenori di potassio (rapporto atomico K/Fe = 0,02, 0,04 e 0,1 - Figura 274).

Il catalizzatore con un K/Fe= 0,04 (Cat Zn4K) presenta la più alta area superficiale (114 m^2/g) a cui corrisponde anche la minore cristallinità. Il tenore di potassio oltre ad avere effetto sulle proprietà morfologiche, diminuisce anche la riducibilità in quanto le temperature a cui avvengono tali reazioni sono traslate a valori superiori. Questo risultato può essere spiegato considerando il comportamento elettron-donatore del potassio, che favorendo l'interazione tra l'ossido di ferro e il potassio, sfavorisce l'adsorbimento dell'idrogeno e quindi la riducibilità del sistema. Inoltre, alti carichi di potassio determinano sia una maggiore quantità di carburi/specie carboniose depositate sulla superficie catalitica sia un innalzamento delle temperature a cui iniziano a formarsi tali specie.

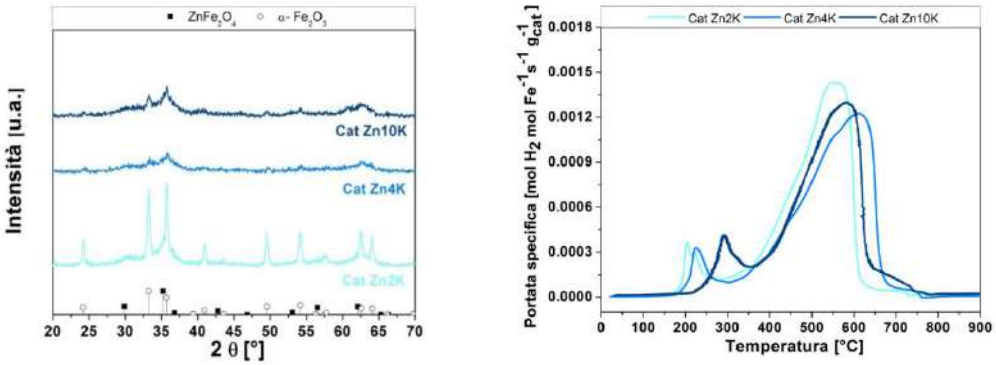


Figura 274. XRD (sinistra) e profili H_2-TPR (destra) per i catalizzatori Cat Zn2K, Cat Zn4K e Cat Zn10K

Con la seconda attività si è investigata la reattività dei sistemi catalitici in presenza di miscele $CO_2/H_2/N_2$ e $CO/H_2/CO_2$. In Figura 275 sono riportati i risultati di conversione e selettività per i tre differenti sistemi nel caso di alimentazione della miscela $CO_2/H_2/N_2$. Si osserva un innalzamento del livello di attività della sintesi di Fischer-Tropsch in presenza di bassi carichi di potassio, seguito da una sua diminuzione quando si passa all'utilizzo di tenori di potassio superiori ad un rapporto K/Fe=0.04. Si evidenzia come, comunque, gli effetti sulle prestazioni catalitiche in termini di attività siano di modesta entità.

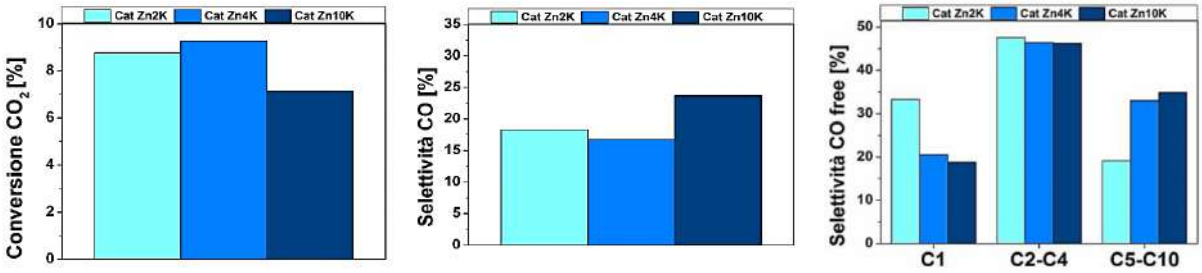


Figura 275. Conversione di CO_2 (sinistra), selettività a CO (centro) e selettività CO-free (destra) per i catalizzatori Cat Zn2K, Cat Zn4K e Cat Zn10K per la miscela $CO/N_2/H_2$

Si osserva, inoltre, che aumentando il tenore di potassio incrementa la selettività ad idrocarburi pesanti (C_5-C_{10}), mentre la selettività a CO presenta un minimo per il sistema Cat Zn4K. In Figura 276 è riportato l'andamento dell'olefina-paraffina da cui si osserva che il potassio incrementi l'olefinicità dei prodotti.

Gli effetti osservati in termini di selettività sono consistenti con l'ipotesi secondo cui il potassio presente in superficie favorisca l'adsorbimento di CO_2 e sfavorisca l'adsorbimento di H_2. Tale effetto sull'adsorbimento competitivo delle due molecole altera infatti il rapporto locale H_2/CO_2, diminuendolo, sfavorendo di conseguenza le reazioni di idrogenazione (terminazione di catena a paraffina), e favorendo quelle di crescita di catena.

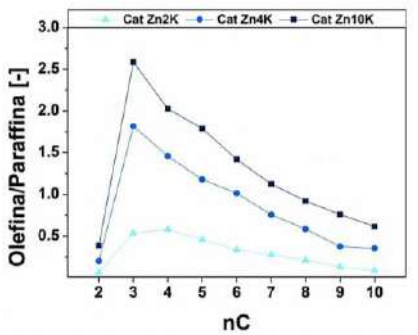


Figura 276. Rapporto olefina/paraffina per la miscela $CO_2/H_2/N_2$

L'effetto del potassio è differente nel caso di una miscela $CO/CO_2/H_2$ in tal caso si ha un incremento della conversione di CO al crescere del tenore di potassio mentre la CO_2 non si converte in maniera apprezzabile

indipendentemente dal tenore di potassio presente sulla superficie del catalizzatore. Anche in questo caso il potassio determina un incremento della selettività ai composti pesanti, ma l'effetto è piuttosto modesto (Figura 277). Non si nota alcun effetto sull'andamento del rapporto olefina/paraffina.

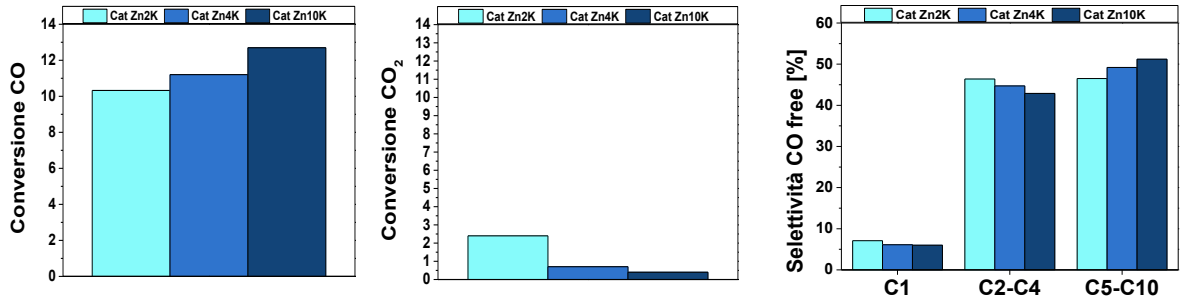


Figura 277. Conversione di CO (sinistra), conversione di CO_2 (centro) e selettività CO-free (destra) per i catalizzatori Cat Zn2K, Cat Zn4K e Cat Zn10K per la miscela $CO/CO_2/H_2$

Nella terza attività si è invece valutato l'effetto del manganese, il quale non ha particolari effetti sulle proprietà morfologiche, il sistema risulta essere più cristallino e si riscontra solamente la formazione della fase ematite (α-Fe_2O_3) senza la formazione di uno spinello misto di manganese e ferro. Interessante è osservare come il catalizzatore promosso con lo zinco per la miscela $CO_2/N_2/H_2$ sia più attivo, abbia una maggiore selettività a CO ed ad idrocarburi pesanti (C_5-C_{10}) (Figura 278).

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/288**.**

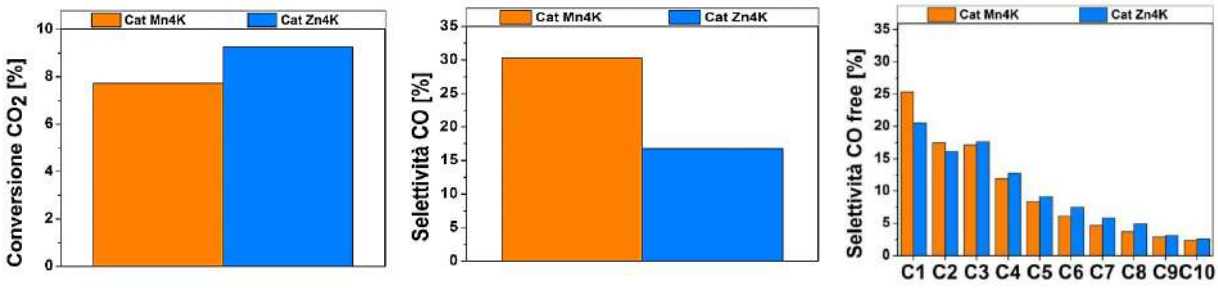


Figura 278. Conversione di CO_2 (sinistra), selettività a CO (centro) e selettività CO-free (destra) per Cat Zn4K e Cat Mn4K

b Cattura della CO_2 in Ossi-Combustione

Nell'ambito dell'Obiettivo b sono state intraprese attività di ricerca a supporto della realizzazione dell'impianto pilota da 48 MWt, dimostratore della tecnologia di ossi-combustione pressurizzata, relative allo sviluppo di sistemi diagnostici, alla valorizzazione delle emissioni di ossidi di zolfo e allo studio di cicli di massima efficienza.

b.1 Sviluppo di sistemi diagnostici

In relazione alle necessità diagnostiche evidenziate, relative alla misura di grandezze caratteristiche del processo di combustione MILD, sono state analizzate e proposte diverse tecniche diagnostiche, finalizzate a:

- misura della concentrazione di ossigeno allo scarico del reattore (1200-1600°C);
- misura della temperatura dei fumi in uscita dal combustore, sempre nel range tra i 1200 e i 1600°C;
- visualizzazioni e applicazione di metodi ottici per il monitoraggio interno al reattore, da porre in relazione alle modalità di funzionamento dello stesso.

Misura della concentrazione di ossigeno allo scarico del reattore

E' stato in primo luogo valutato lo sviluppo di un sistema per la misura percentuale relativa e/o assoluta del contenuto d'ossigeno molecolare nei fumi all'uscita del combustore (1200-1600°C). La tecnologia utilizzata deve consentire una misura dinamica della concentrazione dell'ossigeno molecolare relativa alla percentuale di ossigeno in atmosfera.

Nel corso della presente annualità si è cercato di individuare le tecniche che ad oggi possono, almeno in principio, essere utilizzate per realizzare il sensore anche sulla base di analoghe tecnologie già utilizzate in altri ambiti industriali o utilizzate in laboratorio per la misura di specie gassose.

Sono stati considerati sensori di tipo ottico che utilizzassero la spettroscopia per identificare l'ossigeno perché questi sensori possono operare in situ in ambienti ostili, hanno velocità di risposta inferiori al secondo, possono avere sensibilità elevate fino ai ppm. Lo stesso sensore ottico può essere utilizzato contemporaneamente non solo per monitorare l'ossigeno ma anche specie differenti che possono prodursi per ossidazione nei fumi di post combustione. I sensori presi in considerazione sono:

- sensori ottici basati sulla spettroscopia di assorbimento,
- sensori ottici basati sulla spettroscopia di emissione indotta all'interno di un plasma.

Per quanto riguarda i primi si è considerato l'utilizzo della tecnologie "Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy" (TDLAS) che ha già applicazioni di tipo industriale ma che deve tuttavia essere adattata per tener conto delle specifiche caratteristiche dell'impianto. Questa tecnica viene considerata per misure di temperatura.

Per i sensori basati sulla spettroscopia di emissione indotta da plasma, ci si riferisce ad una tecnologia completamente nuova rispetto al settore della combustione e sperimentata nell'ambito delle produzioni nel campo dell'elettronica.

Il plasma è un gas ionizzato costituito da elettroni, ioni e specie neutre che possono trovarsi sia nello stato fondamentale che nello stato eccitato. Le cariche elettriche libere nel plasma favoriscono diverse reazioni di dissociazione e ricombinazione delle specie chimiche presenti nel gas e alcune di queste avvengono con emissione di luce che può essere rilevata. Inoltre le molecole possono emettere fotoni rilevabili nel caso in cui avvengano transizioni dallo stato eccitato ad uno stato ad energia più bassa. Tutte le reazioni che avvengono nel plasma possono essere utilizzate per determinare la concentrazione relativa delle specie presenti nel plasma.

Il plasma considerato nel presente studio viene generato attraverso una sorgente a radiofrequenza con potenze fino dell'ordine delle decine-centinaia di watt facendo flussare un gas in una camera che è mantenuta a pressioni dell'ordine dei 10^{-3} - 100 mbar. La camera a vuoto ha dimensioni molto ridotte e forma geometrica opportuna con un volume dell'ordine di 500 cm^3. Poiché la sorgente RF trasferisce energia al plasma, le specie presenti non sono mai all'equilibrio termodinamico. Continui processi di eccitazione e diseccitazione si verificano al suo interno con emissione di radiazione luminosa. Parte dello spettro emesso va dall'ultravioletto fino al vicino infrarosso ed è quindi acquisibile con spettrometri compatti a medio-alta risoluzione (risoluzione spettrale di 1-5 nm).

La misura dello spettro emesso dal plasma si basa sulla tecnica della spettroscopia ottica di emissione (OES, "optical emission spectroscopy") che è utilizzata per individuare le specie presenti nel plasma anche per concentrazioni fino a parti per milione. Basandoci sulla spettroscopia ad emissione, si intende sviluppare un sensore per il controllo dell'ossigeno nei fumi prodotti nella combustione MILD.

Spillando il gas dalla linea dei fumi in uscita dal combustore è possibile flussare il gas in una camera in cui viene acceso il plasma in condizioni di pressioni e temperatura tali da favorire l'emissione delle righe appartenenti all'ossigeno atomico 777 e 864 nm che vengono acquisite insieme a quella relativa allo stato eccitato dell'ossigeno molecolare 762 nm che è meno intensa delle due precedenti. A parità di condizioni di pressione l'intensità delle righe aumenterà in proporzione alla concentrazione dell'ossigeno molecolare in ingresso alla camera fornendo così una misura relativa. Si può utilizzare una camera gemella in cui viene fatto flussare ossigeno puro con concentrazione nota per utilizzarla come riferimento. I due sistemi forniscono un segnale in uscita proporzionale alla concentrazione di ossigeno atomico che può essere utilizzato come feedback per l'immissione dell'ossigeno nel combustore.

I risultati dell'indagine e le proposte sono descritte nel rapporto RdS/PAR2013/300.

Misura della temperatura dei fumi, e metodi ottici per il monitoraggio interno al reattore

La chemiluminescenza consiste fondamentalmente nell'emissione di radiazioni luminose che può accompagnare una reazione chimica esoergonica, ossia una reazione in cui il contenuto di energia dei prodotti è diminuito rispetto a quello dei reagenti.

La caratteristica importante della chemiluminescenza per il controllo della combustione è la possibilità di collegarla ad alcuni parametri importanti nelle fiamme. In particolare la luce emessa dall'OH* è più intensa in condizioni magre fino a stechiometriche, mentre il CH* e il C_2* sono più forti in condizioni di miscela ricca.

Dal momento che l'intensità dell'emissione è generalmente proporzionale alla velocità di produzione chimica di determinate specie, l'intensità della emissione può essere correlata alla velocità delle reazioni chimiche. Per

questo motivo, la *chemiluminescenza* è stata usata come una misura in prima approssimazione della velocità di rilascio termico e anche del rapporto di equivalenza.

Per quanto riguarda la molecola dell'ossigeno i picchi con maggiore intensità luminosa di chemiluminescenza, e quindi quelli di maggiore interesse, sono quelli a 337 e 759,3 nm.

In questo subtask sono state considerate la tecnica ODC (*Optical Diagnostics of Combustion*) sviluppata e brevettata dall'ENEA, le varie tecniche di interferometria sviluppate dalla società inglese OXSENSIS, e la tecnica di assorbimento TDLAS.

Metodologia diagnostica ODC. La metodologia diagnostica denominata ODC, sviluppata e brevettata in ENEA, è basata sull'analisi delle emissioni ottiche nel range UV-VIS e permette anche di individuare, nel loro stato di incipienza, anomalie funzionali sia di tipo fluidodinamico che termoacustico, in quanto riesce ad osservare, discriminandoli, i fenomeni precursori di questi, consentendo in tal modo un tempestivo intervento sul processo.

Il sensore ottico che è investito dall'energia radiante emessa dalla fiamma entro il suo angolo visuale, rileva istantaneamente in maniera sovrapposta le intensità dei singoli contributi distribuiti su diverse lunghezze d'onda λ. L'energia radiante raccolta dal sensore si deve intendere non solo circoscritta ad un "cono di vista" nello spazio, ossia di propagazione generato dal filtraggio direzionale del dominio osservato, ma anche integrata sulla banda passante [λ_1, λ_2] del dispositivo ricettore costituito dal fotodiodo.

Tabella 86. Schema riassuntivo dell'efficacia delle tecniche diagnostiche esaminate per l'analisi delle variabili che è necessario misurare nell'impianto per ossi-combustione pressurizzata da 48 MWt presso il bacino del Sulcis

Grandezza misurata	Tecnica ODC nel campo UV (ENEA)	Tecnica ODC nel campo IR (ENEA)	Sonda ottica *i-Phire™ 200 Series - Multi-Parameter Interrogator (MPI)* (OXENSYS)
A) misura del contenuto (concentrazione) di O_2 nei fumi post-combustione	non è capace di effettuare tale misura	non è capace di effettuare tale misura	non è capace di effettuare tale misura
B) misura della temperatura dei fumi in uscita dal combustore	non è capace di effettuare tale misura	X applicabile allo studio della dinamica di T	X
C) monitoraggio interno al reattore	X	X	X

Il sistema ODC ha un basso 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 (monocristallo in zaffiro). Per queste sue caratteristiche esso si mostra particolarmente adatto al monitoraggio di camere di combustione in impianti energetici o di trattamento termico.

Lo strumento ODC, e le metodologie in esso implementate, permettono di monitorare, analizzare e diagnosticare in tempo reale lo stato di instabilità fluidodinamica e termoacustica di un processo di combustione, cosa necessaria per realizzare un efficiente sistema di controllo che permette di risolvere le interattività, anche temporali, tra le due fenomenologie.

La tecnica ODC può anche essere utilizzata non solo per il *monitoraggio del processo* di combustione nell'irraggiamento UV-VIS della fiamma (chemiluminescenza dei radicali eccitati OH*, CH*, C2*), ma anche per il monitoraggio dell'emissione IR dei gas combusti, che è una diretta *misura della temperatura T* nella zona reagente. Utilizzando un sensore ottico che abbia un range spettrale di sensibilità tra 1000 e 5000 nm si possono quindi ottenere informazioni anche della dinamica nel campo dell'IR. In questo caso è possibile andare ad analizzare la *dinamica della temperatura*, ma non risulta possibile fornire un valore della temperatura.

Interferometro i-Phire™ OXSENSIS. Il sistema brevettato dalla società inglese OXSENSIS, sempre basato su sensore ottico, utilizza la tecnica interferometrica Fabry-Perot per misurare le dimensioni della cavità ottica che varia con la pressione applicata. Anche in questo caso la testa del sensore è un monocristallo in zaffiro. Le riflessioni sulle due interfacce della cella di misura, interferiscono costruttivamente o distruttivamente a seconda di come cambia la dimensione della cavità. La luce risultante viene poi misurata dall'interrogatore. Nella tabella 87 vengono riportate in maniera schematica le varie caratteristiche delle unità di interrogazione.

Tabella 87. Unità di interrogazione realizzate dalla Oxsensis e relative caratteristiche

Tipo di sensore	Tipo di misura	Osservazioni
i-Phire™ 100 Series *- Optical interrogator units – Dual Wavelength Interrogation (DWI)*	Misura parallela (4 canali) e in real-time della pressione dinamica	• range pressione dinamica: 1-20 kHz La sua efficacia è già stata dimostrata in un ambiente industriale operativo per un tempo > 12.500 ore.
i-Phire™ 200 Series *- Multi-measurand optical interrogators - Multi-Parameter Interrogator (MPI)*	Misura parallela (4 canali) e in real-time della pressione dinamica, della pressione statica e della temperatura della sonda.	• range pressione dinamica: 1-20 kHz • range della pressione assoluta: DC-20 kHz • range della temperatura: 0-1000 °C ad una frequenza nel range DC-100 Hz E' importante osservare che la temperatura misurata è quella della sonda e non quella dei gas, quindi è una misura puntuale e intrusiva.
i-Phire 300 Series *- The ultimate in spectral interrogation*	• Misura parallela (4 canali) e in real-time della pressione dinamica, della pressione statica e della temperatura della sonda. • Misura l'intero spettro del segnale di luce riflessa dal sensore.	• range: DC-300 Hz

*Tecnica TDLAS***.** Risulta che la tecnica può essere usata solo quando la pressione del gas è bassa (dell'ordine di pochi mbar), e quindi non risulta adatta alle caratteristiche richieste dall'impianto oggetto di questa ricerca. Inoltre la precisione della misura della concentrazione tramite tecnica TDLAS è limitata dall'instabilità della sorgente laser utilizzata (ossia alle fluttuazione della sorgente di luce emessa dai tunable laser) e dalla presenza di gas la cui caratteristica ottica può interferire nella misura.

In conclusione ottimi risultati sono stati ottenuti in merito alla possibilità di misurare la temperatura dei fumi in uscita dal combustore e studiarne la loro dinamica. Inoltre si evidenzia la possibilità di ottenere parametri, come ad esempio il valore della pressione assoluta, della pressione dinamica, delle velocità dei gas e delle fluttuazioni di formazione dei radicali, da mettere in relazione alle modalità di funzionamento dell'impianto pilota in ossi-combustione pressurizzata.

L'attività è stata svolta interamente da ENEA è descritta nel rapporto RdS/PAR2013/272**.**

b.2 Produzione acido solforico dai fumi di ossi-combustione: attività sperimentale di laboratorio

Altra problematica di interesse riguarda il trattamento degli effluenti gassosi del sistema "reattore", e tra questi ultimi, la conversione di ossidi di zolfo in acido solforico (i consideri che nel caso di alimentazione con carbone del Sulcis, l'SO_2 può arrivare fino al 5% in volume).

La presenza di grandi quantità di SO_2 pone notevoli problemi di purificazione dei gas prima di procedere allo scarico o allo stoccaggio della CO_2 o del suo utilizzo. In alternativa, il biossido di zolfo può essere ossidato a triossido ed assorbito in acqua per ottenere acido solforico.

Circa quest'ultimo aspetto, l'attività riguarda lo sviluppo di un sistema di conversione degli ossidi di zolfo (SO_2 e tracce di SO_3) presenti negli effluenti gassosi dal reattore a ossi-combustione, che abbia il duplice vantaggio di eliminare tali composti, limitando l'impatto ambientale e rischi di corrosione, producendo al tempo stesso acido solforico (H_2SO_4) di elevata purezza ed alto valore commerciale. L'acido solforico è un prodotto commerciale dai molteplici impieghi ed è il prodotto chimico sintetizzato in maggiore quantità al mondo (~200 Mt/y). Risulta pertanto ragionevole dotare l'impianto di ossicombustione di un sistema per la conversione di SO_2 in H_2SO_4.

L'ossidazione dell'SO_2 è una reazione esotermica:

$$SO_{2\,(g)} + \tfrac{1}{2}\, O_{2\,(g)} \leftrightarrows SO_{3\,(g)}$$

$\Delta H° = -98.3$ kJ/mol
$\Delta G° = 0$ @ 780 °C

Il processo con cui viene eseguita l'ossidazione è noto come processo a contatto e prevede l'utilizzo di un catalizzatore. Attualmente si usano catalizzatori a base di V_2O_5 con promotori a base di metalli alcalini (K, Cs) per abbassare la temperatura di esercizio che si aggira intorno ai 400 °C.

Il catalizzatore è impiegato in fase solida, anche se in realtà la fase catalitica attiva è liquida per effetto della formazione di uno strato liquido sulla superficie del catalizzatore. In questo liquido diffonde la SO_2 gassosa che reagisce con V_2O_5 in una reazione redox dove il V(*V*) ossida prima SO_2 ad SO_3 riducendosi a V(*IV*) che successivamente reagisce con l'ossigeno per ripristinare V_2O_5:

$$V_2O_5 + SO_2 \leftrightarrows V_2O_4 + SO_3$$

$$V_2O_4 + ½\ O_2 \leftrightarrows V_2O_5$$

I meccanismi di disattivazione del catalizzatore sono principalmente:

- perdita del vanadio;
- avvelenamento da parte di impurezze;
- degradazione del supporto e suo sintering;
- riduzione di V(*V*) a V(*III*) difficilmente riossidabile a V(*V*).

Per ognuno dei meccanismi di perdita dell'attività catalitica si adottano opportuni accorgimenti, p.e. controllare la temperatura permette di evitare il sintering; evitare la prolungata esposizione del catalizzatore a temperature inferiori al dew-point della miscela SO_3/H_2O previene la riduzione del vanadio a V(*III*).

Gli impianti industriali sono distinti in singolo stadio di assorbimento e doppio stadio di assorbimento. In principio un impianto è costituito da un sistema di pretrattamento dei gas in entrata che preservi il catalizzatore da eventuali sostanze avvelenanti e da un sistema di abbattimento dell'umidità, anch'essa nociva per il catalizzatore. Successivamente si passa al letto catalitico che può essere costituito da 2, 3, 4 o 5 sezioni in serie. A causa della esotermicità della reazione di ossidazione, fra le varie sezioni si interpone uno stadio di raffreddamento che recupera calore per il preriscaldo dei gas in ingresso e mantiene la temperatura di reazione fra 400 e 500 °C.I uscita ai letti catalitici, il gas che contiene SO_3 viene inviato all'assorbitore che è costituito da acido solforico concentrato. Il prodotto dell'assorbimento è pertanto costituito da acido solforico fumante (oleum), cioè da una soluzione di SO_3 in H_2SO_4.

La tecnologia per la conversione catalitica di SO_2 ad SO_3 è come abbiamo già visto ben sviluppata e non richiederebbe alcuna attività sperimentale aggiuntiva se la miscela di alimentazione fosse costituita, come accade negli impianti in esercizio, da SO_2 e O_2/aria. La novità nel nostro caso deriva dalla presenza, nella miscela gassosa di alimentazione, di grandi quantità di CO_2. L'effetto del biossido di carbonio sull'equilibrio $SO_2 \leftrightarrows SO_3$ non è riportato e quindi è giustificato l'interesse di questo studio. In particolare si è dovuto valutare la risposta del catalizzatore alla presenza di CO_2, che potrebbe, nell'intervallo di temperatura di esercizio, formare composti carboniosi influenti sull'attività catalitica.

L'attività oggetto del presente subtask è partita ex-novo nei laboratori ENEA sulla scorta della pregressa esperienza sullo studio della dissociazione catalitica dell'acido solforico, la reazione inversa a quella in oggetto. La prima fase è stata perciò dedicata all'allestimento di un idoneo apparato sperimentale ed alla acquisizione dei materiali necessari all'attività sperimentale di base. L'apparato progettato risponde principalmente a dettati di semplicità di esercizio e sicurezza delle prime operazioni, si è pertanto allestito l'impianto riportato in Figura 279.

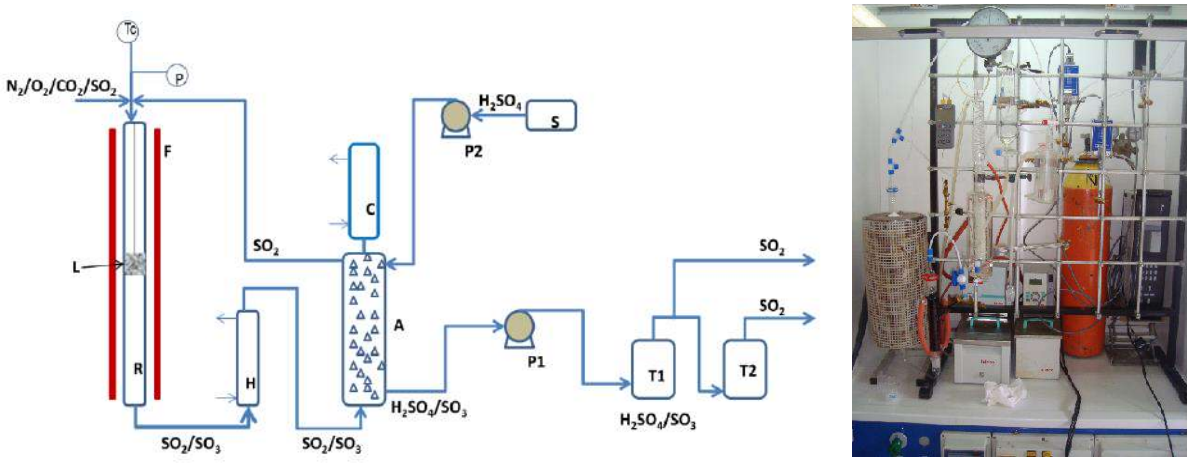


Figura 279. Apparato sperimentale in scala laboratorio per la produzione di H_2SO_4

La misura della quantità di SO_3 formata, ovvero della efficienza di conversione, è effettuata per cromatografia ionica quando le concentrazioni di solfato sono relativamente base, mentre quando la concentrazione di solfato è elevata o quando si opera l'assorbimento in acido solforico concentrato si adotterà la misura della densità della soluzione. Infatti, l'acido solforico presenta apprezzabili variazioni della densità con la concentrazione che possono essere utilmente sfruttate.

Le attività sono descritte nel rapporto RdS/PAR2013/289.

b.3 Analisi di ciclo e studio della soluzione di massimo efficientamento dell'impianto integrato da 48MWt

Nel 2006 ENEL e ITEA danno inizio ad una collaborazione volta allo sviluppo di un ciclo di potenza a carbone con peculiarità "zero emission", mediante l'utilizzo della tecnologia ISOTHERM PWR® basata su diversi brevetti di proprietà ITEA. Il cuore tecnologico del sistema è costituito da un ossi-combustore "flameless" in pressione, in grado di estrarre energia termica da carbone, anche di basso rango, con contemporanea separazione delle ceneri mediante estrazione delle stesse allo stato fuso. La combustione pressurizzata, unitamente all'alta concentrazione di anidride carbonica ed acqua nei fumi, consentono di includere la tecnologia nel novero dei sistemi "capture ready".

Il presente lavoro ha come obiettivo uno studio esplorativo volto alla valutazione, in termini di efficienza, dell'accoppiamento tra il processo ISOTHERM PWR® ed un ciclo di potenza non convenzionale, basato sull'utilizzo della CO_2 supercritica (S-CO_2) come fluido di lavoro. L'interesse per questo tipo di soluzione nasce dall'opportunità di configurare sezioni di potenza particolarmente compatte, in grado di esprimere valori della densità di potenza per m^3 di fluido trattato, di alcuni ordini grandezza superiori rispetto allo stato dell'arte. A questa peculiarità si è voluto associare una configurazione di impianto "semplice" nell'ottica di finalizzare la soluzione proposta alla rapidità di risposta alle variazioni di carico, esigenza oramai di primo piano visto il crescente impatto sul sistema elettrico delle rinnovabili non programmabili. Si è pertanto rinunciato ad adottare alcuni espedienti impiantistici utilizzati per incrementare l'efficienza dei sistemi di conversione, con particolare riferimento alla soluzione dei surriscaldamenti ripetuti, coscienti delle ricadute termodinamiche che ne conseguono.

Il risultato è stato un sistema "agile" (Figura 280) con un'unica estrazione di calore ad alta temperatura, al prezzo di inevitabili penalizzazioni in termini di rendimento che, tuttavia, sarebbe interessante valutare in termini redditività economica del sistema di conversione, considerata la notevole compattezza dei componenti d'impianto, presumibilmente meno costosi, e la possibilità di utilizzare carboni di basso rango.

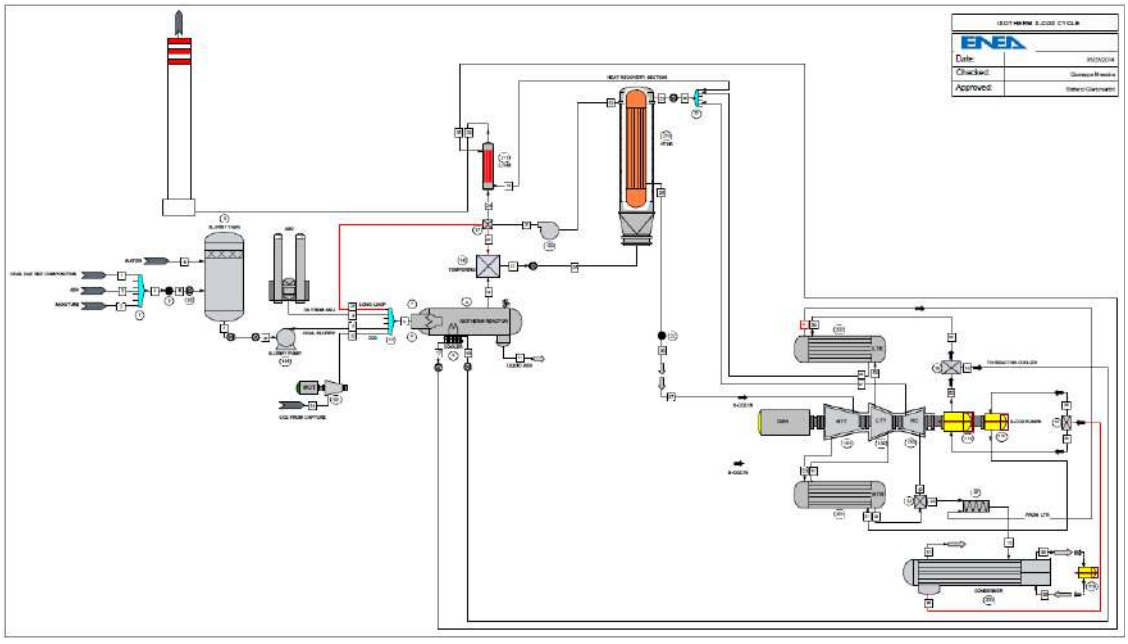


Figura 280. Isola di potenza a S-CO_2 (in basso a destra) accoppiata con il loop ISOTHERM PWR® (al centro)

L'analisi effettuata consente di affermare che le limitazioni termodinamiche ed impiantistiche imposte al ciclo a S-CO_2 comportano una chiara penalizzazione in termini di efficienza di conversione, che tende ad attenuarsi, comunque mai del tutto, nell'ipotesi di non computare il valore energetico dell'ossigeno. Ciò non è del tutto fuori luogo, in quanto lo stesso ciclo a S-CO_2 qui proposto può essere accoppiato, con la medesima efficienza, a sorgenti termiche non necessariamente basate sull'ossi-combustione. In questa ipotesi le differenze tendono ad attenuarsi, attestandosi a meno 4% di penalizzazione rispetto allo stato dell'arte della conversione a vapore ultra-supercritico (USC). L'analisi evidenzia il potenziale in termini di rapidità di risposta al variare del carico attribuibile al ciclo a S-CO_2, ciò sia in virtù del layout impiantistico più snello, sia per la densità di potenza decisamente superiore rispetto al caso di riferimento. Importanti e non scontate conclusioni potrebbero emergere dall'analisi tecnico-economica, tuttavia lo studio effettuato consente di affermare che se i cicli USC trovano il loro campo di applicazione "naturale" nel base-load, i cicli a S-CO_2 potrebbero dare risposte efficaci laddove la flessibilità di carico diviene un requisito essenziale.

I risultati dell'indagine sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/298.

c. Sperimentazione di una rete fissa e mobile di monitoraggio geochimico nell'area del bacino Sulcis

Oggetto dell'obiettivo è la caratterizzazione geochimica del bacino carbonifero del Sulcis, con attività di monitoraggio continuo e discontinuo superficiale e in pozzi, nonché la caratterizzazione geologico-strutturale dell'area attraverso l'analisi e la mappatura delle faglie e delle zone di fratturazione superficiale delle formazioni appartenenti al *reservoir,* al fine di ricostruire la permeabilità ai gas dei suoli.

Il monitoraggio continuo di una vasta serie di punti selezionati, con prospezioni periodiche dei gas nel suolo, unitamente a quello discontinuo di singolarità, e all'accurata indagine geologico-strutturale, porterà alla progressiva comprensione del sistema naturale "bacino carbonifero Sulcis" in condizioni indisturbate, e di conseguenza alla previsione e al riconoscimento di vere anomalie nel caso in cui questo possa rappresentare un sito di stoccaggio.

Le attività di monitoraggio della CO_2 svolte durante l'ultima annualità da personale di ENEA e dell'unità di ricerca del CERI dell'Università Sapienza di Roma, sono descritte nel rapporto RdS/PAR2013/287.

Le attività di monitoraggio dei gas provenienti dal suolo sono state svolte presso differenti siti situati nell'area del bacino minerario del Sulcis (provincia di Carbonia-Iglesias nel Sud Ovest Sardegna). La rete di monitoraggio fisso esistente è stata potenziata, a cura dell'Università, con l'installazione di numerose stazioni multiparametriche in altrettante postazioni di rilevamento.

l'ENEA ha effettuato un monitoraggio discontinuo dei gas da suolo in singolarità (faglie) del potenziale bacino di stoccaggio, avvalendosi di una stazione mobile di monitoraggio di CO_2 (flussi, concentrazioni), H_2O e temperatura, basata su analizzatore all'infrarosso NDIR. Queste misure permettono di ampliare le capacità di descrizione del sistema naturale, specie in una situazione antecedente la fase di iniezione di CO_2, ove i tempi caratteristici che interessano la variabilità di emissione sono su scala stagionale, e quindi dati acquisiti in tempi diversi, sono tra loro correlabili.

In particolare le attività hanno riguardato:

- la misura delle concentrazioni e dei flussi di CO_2 da suolo effettuate da ENEA, nel corso degli ultimi mesi del 2013 fino a Settembre 2014, nell'area del bacino carbonifero del Sulcis condotte con la finalità di supportare le attività di monitoraggio baseline delle concentrazioni e dei flussi di CO_2 da suolo condotte da altri partner del progetto (Figura 28);
- la misura delle concentrazioni delle di CO_2, metano, elio, propano ed altri idrocarburi e dei flussi di CO_2 effettuate da CERI nel corso del 2014.

Si è operato su differenti siti posti nell'intorno dell'area del bacino del Sulcis, nei pressi del sito di Monte Ulmus e nella periferia sud di Carbonia effettuando (in parallelo a quanto svolto da CERI) misure di concentrazione e di flusso al suolo anche in corrispondenza ai punti più critici individuati da CERI. I primi risultati sono in linea con quanto ci si attendeva con valori normali relativi a flussi caratteristici di zone rurali non particolarmente emissive.

Le attività sviluppate dall'Università riguardano invece l'attuazione di un piano di monitoraggio geochimico continuo e discontinuo per lo stoccaggio geologico della CO_2 e la sua sperimentazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis.

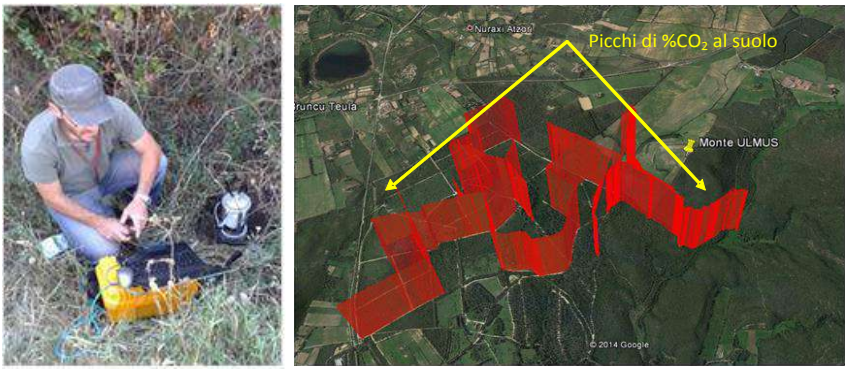


Figura 281. Attività di monitoraggio della concentrazione e del flusso di CO_2 dal suolo

Le attività sono finalizzate alla caratterizzazione del bacino carbonifero eocenico del Sulcis caratterizzato da estesi depositi sub-bituminosi che coprono una superficie di circa 800 km^2 le cui riserve sono state stimate in circa 1,2 miliardi di tonnellate. L'unità produttiva in affioramento vicino alle città di Gonnessa e Bacu Abis immerge a circa 10° S-SW, raggiungendo profondità superiori agli 800 m vicino alla costa e oltre 1500 metri in mare aperto. Questi depositi sono sfruttati a una profondità di circa 400 m utilizzando le tecniche di estrazione tradizionali nella parte settentrionale del bacino, ma la profondità e lo spessore delle unità verso sud rendono più difficile l'accesso rendendoli non sfruttabili economicamente.

Gli studi in oggetto comprendono sia attività di superficie che di laboratorio. Le indagini superficiali hanno previsto le attività di monitoraggio continuo e discontinuo finalizzati alla caratterizzazione geochimica del sito. Lo studio è stato quindi articolato nelle seguenti fasi:

- Soil gas survey sull'area interessata con una maglia di campionamento opportuna, al fine di:
  - costruire la baseline del sito;
  - evidenziare potenziali vie preferenziali di risalita di fluidi verso la superficie;
  - individuare i punti dove installare le stazioni di monitoraggio in continuo.

  Tali dati vanno ad integrare quelli già acquisiti dalla Carbosulcis e hanno permesso di migliorare le informazioni sulla "baseline" della CO_2.
- Installazione di stazioni di monitoraggio continuo con sonde multi-parametriche per:
  - lo studio delle variazioni delle emanazioni gassose naturali, al fine di ottenere una migliore definizione della "baseline";
  - l'individuazione delle soglie di anomalia (treshold anomalies) per il monitoraggio nelle varie fasi dello stoccaggio (selezione del sito, iniezione e post iniezione);
  - aiutare la comunicazione (public awareness) con le autorità locali e la popolazione (stakeholder).
  -

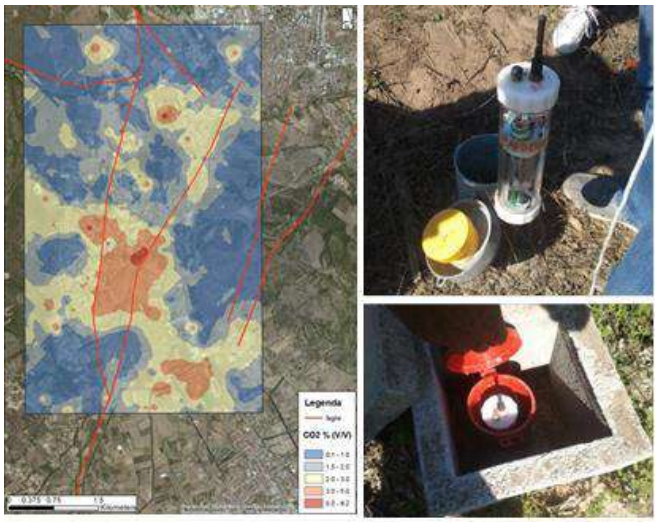


Figura 282. Contour map della CO_2 nella valle di Carbonia e posizionamento delle sonde nei piezometri

Le sonde sono di due tipi in funzione del loro uso. Nei suoli vengono posizionate sonde capaci di misurare in continuo la concentrazione della CO_2 nella zona insatura del terreno, la pressione barometrica e la temperatura a profondità variabile, mentre nei pozzi (acquiferi superficiali e/o profondi) sonde multi-parametriche capaci di misurare: pH, p_{CO2}, pressione idrostatica (misure piezometriche) e temperatura dell'acqua di falda. La conoscenza di questi parametri di base servirà, oltre che per gli scopi sopra elencati, alla definizione delle complesse interazioni della CO_2 con rocce e acquiferi superficiali.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

L'obiettivo attiene all'opera di comunicazione e diffusione dei risultati del progetto in diversi ambiti e forme. A questa azione partecipano ENEA, Sotacarbo e gli altri partner scientifici del progetto, in particolare attraverso:

- la pubblicazione di articoli e documenti tecnici a carattere pubblico;
- l'organizzazione di workshop, seminari, convegni;
- l'aggiornamento di un sito web sulle tematiche e le tecnologie CCUS;
- altre iniziative.

Particolare menzione meritano le iniziative, di seguito descritte.

Sulcis Summer School on CCS Technologies

La prima iniziativa è relativa alla 2° edizione della "*Sulcis Summer School on CCS Technologies*", Scuola Estiva sulle Tecnologie di Cattura e Stoccaggio della CO_2, tenutasi presso il Centro Ricerche Sotacarbo - Carbonia, organizzata nel Luglio 2014.



Figura 283. Foto di gruppo dei partecipanti alla 2nd CCS Summer School

L'edizione 2014 della durata di cinque giorni ha previsto workshop, lezioni e visite a laboratori e impianti. Il buon esito dell'edizione precedente (2013) è stato confermato grazie anche all'adesione del Clean Coal Centre dell'Agenzia internazionale dell'Energia (IEA) e alla partecipazione di docenti provenienti da enti di ricerca e università di tutto il mondo.

Ottimo anche il livello di soddisfazione degli studenti iscritti, rilevato attraverso un questionario di valutazione finale inserito nel corso e-learning che affiancava le attività in aula. Il questionario, strutturato su quattro aree di attenzione (percezione globale dell'esperienza, didattica, organizzazione e servizi, ambiente e-learning), ha messo in luce i punti di forza della Scuola e alcuni aspetti da migliorare.

Con questa seconda edizione della scuola estiva sulle CCS, organizzata con il fondamentale supporto di università, istituti di ricerca e importanti aziende del settore, da ENEA, Università di Cagliari e Sotacarbo si è voluto offrire ai partecipanti una visione più ampia possibile di tutte le problematiche che ruotano attorno a un tema che è oggi di pressante attualità, come quello della riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera, oltre che fornire informazioni e documentazione sugli aspetti tecnologici della CCS, sullo sviluppo della ricerca, delle sue applicazioni, e sullo stato di attuazione dei progetti in corso a livello europeo e internazionale.

Le lezioni in aula si sono alternate con momenti di formazione sul "campo", che hanno visto i corsisti impegnati in visite ai laboratori e agli impianti della Sotacarbo e in una affascinante "immersione" nelle gallerie del Museo Nazionale del Carbone che ha la sua sede nella Ex Miniera di Serbariu a Carbonia, e con momenti di formazione on line.

Tutti gli iscritti, infatti, hanno avuto accesso alla piattaforma e-learning dell'Unità Tecnica ICT dell'ENEA (http://elearning.enea.it) dove è stato predisposto uno specifico corso sulle CCS e sulla quale hanno consegnato la relazione finale per l'accertamento delle competenze acquisite e per il riconoscimento di crediti formativi universitari (CFU) e di crediti di formazione alla ricerca (CFR) dell'Università di Cagliari.

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali sul tema CCS

Le attività svolte da ENEA 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 CO_2.

Tra gli organismi internazionali per i quali è prevista la partecipazione ENEA citiamo:

- *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 da un "ministerial group" ed è organizzata in task force. La partecipazione ENEA ha in passato 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 CO_2 del SET Plan*. 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, quale coordinatore nazionale, 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.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito delle attività afferenti alla Parte A, sono stati stipulati da ENEA tre Accordi di Collaborazione con i seguenti partner universitari:

- **Università di Roma "Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Meccanica**, collaborazione sul tema:
  "Sviluppo di tecniche e modelli numerici per LES nel codice HeaRT per la simulazione di processi di combustione. Messa a punto e validazione di un solutore per mesh affiancate, e simulazione del mescolamento di due gas in condizioni supercritiche".
  La collaborazione è svolta nell'ambito del Subtask c.1.
- **Università di Roma TRE - Dipartimento di Ingegneria**, collaborazione sul tema:
  "Caratterizzazione sperimentale di un bruciatore avanzato "Trapped Vortex" per turbina a gas. Supporto alla diagnostica ed al trattamento/elaborazione dati".
  La collaborazione è svolta nell'ambito del Subtask b.3.
- **Università de L'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale**, collaborazione sul tema:
  "Messa a punto del sorbente/catalizzatore attraverso studi di cinetica chimica e validazione dei modelli. Follow-up sperimentale della piattaforma pilota ZECOMIX. Partecipazione alle fasi di avviamento reattori, ottimizzazione delle procedure di start-up".
  La collaborazione è svolta nell'ambito del Subtask a.1.

Nell'ambito delle attività afferenti alla Parte B1, sono stati stipulati da SOTACARBO cinque Contratti di Ricerca con i seguenti partner:

- **Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali**, contratto di ricerca sul tema:
  "Modellistica, simulazione dinamica e integrazione di processi di cattura CO_2 con fonti rinnovabili, per impianti con cattura post-combustione".

Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask a.1.

- **Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali**, contratto di ricerca sul tema:
  "Caratterizzazione slurry in ossi-combustione".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask b.1.
- **Università di Roma "Sapienza" - CERI** (Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici), contratto di ricerca sul tema:
  "Indagini geo-strutturali bacino Sulcis".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask c.3.
- **Carbosulcis S.p.A**, contratto di ricerca sul tema:
  "Condivisione delle informazioni relative ad un decennio di attività pregresse volte alla caratterizzazione geologica del bacino del Sulcis".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask c.1.
- **Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV),** contratto di ricerca sul tema:
  "Monitoraggio accurato di piccoli micro-sismi eventualmente generati dalla iniezione della CO_2".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask c.3.

Nell'ambito delle attività afferenti alla Parte B2, sono stati stipulati da ENEA quattro Contratti di Ricerca con i seguenti partner universitari:

- **Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Chimica**, contratto di ricerca sul tema:
  "Sviluppo sistema di purificazione del syngas da Tar e composti dello zolfo mediante innovativi processi di trattamento (craking termico/catalitico)".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask a.3.
- **Università di Cagliari - Dipartimento di Chimica e Geologia**, contratto di ricerca sul tema:
  "Sviluppo nuovo catalizzatore per reazione di metanazione di CO e CO_2"
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask a.3.
- **Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia**, contratto di ricerca sul tema:
  "Sviluppo e test sperimentali di catalizzatori innovativi della sintesi di Fischer-Tropsch".
  Il contratto è svolto nell'ambito del Subtask a.4.
- **Università di Roma "Sapienza" - CERI** (Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici), contratto di ricerca sul tema:
  "Sperimentazione di una rete fissa di monitoraggio geochimico nell'area del bacino Sulcis. Indagine geologico-strutturale delle faglie per stima permeabilità del sito".
  Il contratto è svolto nell'ambito dell'obiettivo c.

Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per i nucleare di IV generazione

Il programma triennale 2012-2014, modulato sulle esigenze del Paese a seguito dell'incidente di Fukushima e del successivo referendum, prevede che le attività di R&S siano incentrate su due macro aree:

- presidio e sviluppo di un sistema di competenze scientifiche in grado di assicurare la corretta gestione delle residue attività nucleari, in particolare sotto il profilo della sicurezza;
- ricerca e sviluppo tecnologico, con ricadute sul tessuto industriale, relative alla fissione di 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 affrontati nell'ambito del progetto 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 riguarderanno 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 inquadrate nelle iniziative internazionali (GIF) ed europee (SNETP, ESNII, EERA) alle quali il nostro Paese ha aderito.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Per la seconda annualità del PT 2012-2014, il lavoro prevede di rendere disponibili una serie di prodotti così costituiti:

a. 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;
b. analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari e relativi cicli del combustibile;
c. progettazioni e qualifiche di componenti e sistemi per impianti nucleari di quarta generazione;
d. sviluppo di materiali per sistemi nucleari innovativi.

Tutto ciò al fine di contribuire ulteriormente 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.

Tali infrastrutture di ricerca, concordate e realizzate in sinergia con Ansaldo Nucleare, permettono inoltre alle industrie nazionali del settore di essere competitive sia a livello europeo sia internazionale per accedere a commesse concernenti la realizzazione di sistemi nucleari di nuova generazione (MYRRHA, ASTRID, ALFRED, SVBR-100, HYPERION, BREST-300, CLEAR-I), sia di larga scala sia di tipo SMR. Tali attività avranno ricadute pressoché immediate sul tessuto industriale nazionale, considerando che i primi cantieri dovranno essere avviati nei prossimi 5-10 anni (es. SVBR-100 e CLEAR-I entro il 2017).

Tutte le attività sono portate avanti nell'ambito di grandi iniziative internazionali/europee o di programmi bilaterali svolti in collaborazione con istituzioni di ricerca di Paesi con i 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.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate e tenendo conto delle attività tecniche avviate in ambito nelle precedenti annualità dell'AdP, in continuità con il PAR 2012, le attività del progetto sono articolate in 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.

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. Si è proseguito il lavoro di sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o pre-emergenza, realizzando studi deterministici, probabilistici (PSA) e probabilistici-deterministici (IDPSA) per la stima del rischio, le verifiche di sicurezza e l'analisi di sequenze incidentali. Nell'ambito della qualifica e caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica, presso le facility sperimentali della SIET si sono realizzate campagne sperimentali per la qualifica di strumentazione innovativa, e per la validazione di modellistica e codicistica.

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 e sui sistemi Small Modular Reactor veloci che riscuotono particolare interesse in Europa e da parte dell'industria nazionale.

Le principali attività di ricerca 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. Si è implementato ed esercito un laboratorio per la chimica del refrigerante, avviando studi e analisi sui fenomeni base del controllo dell'ossigeno disciolto in metallo liquido.

Infine si sono implementate infrastrutture di ricerca di enorme rilevanza (HELENA) e aggiornate le infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE, LECOR), con lo scopo sia di caratterizzare lo scambio termico nel nocciolo, sia di caratterizzare sperimentalmente i sistemi di trasporto termico (DHR, SG). Si è realizzata la sezione di prova HERO, primo esempio di prototipo sperimentale del generatore di vapore di un LFR.

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

E' importante ricordare che in Italia, dove da tempo le centrali dotate di reattori di GEN-II sono state fermate, non è necessario procedere a studi e applicazioni finalizzate al miglioramento dello standard di funzionamento di questo tipo di sistemi. Per contro, come Paese Occidentale 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 di funzionamento dei sistemi di GEN-II e concentrando i propri sforzi nella ricerca e nella cooperazione internazionale per l'impiego sicuro, anche oltre i suoi confini geografici, del nucleare di prossima generazione (GEN-III e GEN-IV).

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. Permane l'esigenza di conservare nel nostro Paese un sistema di competenze scientifiche e di infrastrutture tecniche e scientifiche di ricerca in grado di assicurare la corretta gestione delle residue attività nucleari, sviluppando in particolare una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche dal punto di vista della sicurezza, anche ai fini degli adempimenti

stabiliti dalla Commissione Europea. Per questo motivo diventa importante concretizzare il percorso di ricerca tracciato nell'arco dei tre anni di studi dell'attuale Piano Triennale. Tema di fondo, per quanto riguarda l'aspetto sicurezza nucleare, inteso come "*nuclear safety*", è la ricognizione delle possibili conseguenze di eventi incidentali di diversa gravità che potrebbero interessare le centrali situate a meno di 200 km dai confini nazionali, preparando un ranking nella scala dei rischi e fornendo indicazioni agli organi competenti affinché possano essere attuati efficacemente i piani di intervento e le azioni conseguenti. Questo percorso, che trova una serie di rilevanti indicazioni in termini di quantificazione delle conseguenze derivanti da eventi incidentali in centrali prossime ai confini nazionali, è naturalmente alimentato dalle conoscenze acquisite dai ricercatori con riferimento più generale ai vari sistemi nucleari attualmente impiegati in Europa, non necessariamente solo a quelli localizzati entro i 200 km. E' unanimemente riconosciuto, a livello scientifico internazionale, che spesso, per trarre conclusioni e indicazioni significative su sistemi di una certa taglia e configurazione, sia inizialmente necessario fare ricorso a sistemi analoghi, da cui poi elaborare dati e caratteristiche, anche attraverso processi di scaling.

Risulta quindi evidente quanto sia necessario conservare e rafforzare le competenze in tal senso 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 da poco conclusi progetti PHEBUS, SARNET2, CP-ESFR, GOFAST_R, SARGEN-IV e quelli ancora attivi, quali CESAM, JASMIN e NURESAFE. Le attività condotte da ricercatori ENEA in questi progetti sono state fortemente sinergiche con quelle svolte nella precedente annualità e lo sono con quelle svolte nel PAR 2013, 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 sono arricchite anche dalle attività condotte nell'ambito di accordi di cooperazione internazionale con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission), in cui convergono gli interessi di varie decine di organizzazioni dei vari continenti, impegnate nella ricerca e lo sviluppo della safety nel campo della fissione nucleare.

Con le attività sviluppate nell'attuale annualità, sfruttando il background internazionale acquisito e i risultati delle attività svolte in precedenza, è stato possibile aumentare ulteriormente le conoscenze di base ed arricchire l'esperienza precedentemente maturata. Si fa sempre riferimento all'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 si articola in tre macro-obiettivi, più un obiettivo relativo alla diffusione e comunicazione dei risultati.

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 e statunitense NRC, sono relativi alle varie tematiche implicate nel funzionamento di un sistema estremamente complesso come un impianto nucleare: modellistica di base per la realizzazione di librerie di dati nucleari, studi di modelli per il calcolo di sezioni d'urto, aggiornamento di librerie di decadimento per il calcolo dell'attivazione dei materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico, 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, analisi di pre- e post-test a supporto di programmi sperimentali per la validazione dei codici ICARE/CATHARE e ASTEC, verifica dei progressi nell'affidabilità della risposta dei codici integrali ASTEC e MELCOR 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. CIRTEN ha contribuito a queste attività con la partecipazione delle università di Pisa e di Bologna.

a.1 Dati nucleari e librerie per schermaggio e dosimetria

Studio di modelli per il calcolo di sezioni d'urto di fissione e simulazione con codice Monte Carlo delle distribuzioni angolari dei prodotti di fissione

La fissione indotta da nucleoni ad energie intermedie è importante nella fisica nucleare sia a livello fondamentale, sia nelle applicazioni ingegneristiche. Dal punto di vista dei fondamenti, una teoria in grado di descrivere la fissione indotta da nucleoni in un ampio range di nuclei bersaglio e un ampio intervallo di energie è ancora carente quindi, come valida integrazione, è necessario ricorrere a simulazioni Monte Carlo in grado di riprodurre i dati delle reazioni (p, f) e (n, f) ad energie intermedie. Dal punto di vista delle applicazioni ingegneristiche, i dati di cui sopra sono molto importanti per la produzione di energia, la trasmutazione dei rifiuti radioattivi e il progetto di schermi antiradiazione per gli acceleratori. In particolare, dati accurati di sezioni d'urto neutroniche sono essenziali per la progettazione di reattori di quarta generazione e, per quanto riguarda le energie intermedie, per la progettazione dei sistemi subcritici guidati da acceleratore (ADS). Calcoli Monte Carlo di fissione degli attinidi e dei pre-attinidi indotti da protoni e neutroni nel range di energia gamma da 100 MeV a 1 GeV sono effettuati mediante una versione recente di Liège. Si ha un modello "*intranuclear cascade*", INCL ++, accoppiato con due diversi codici di "*evaporation-fission*", GEMINI ++ e ABLA07. Al fine di riprodurre le sezioni d'urto di fissione sperimentali, i parametri del modello sono solitamente regolati sulla base di sezioni d'urto (p, f) e usati per predire sezioni d'urto (n, f) per gli stessi isotopi. Il modelINCL ++, accoppiato con ABLA07, è stato utilizzato anche all'interno di simulazioni Monte Carlo basate sul codice GEANT 4. Il bersaglio di spallazione dell'esperimento n_ TOF (CERN) è stato simulato per fare un dettagliato studio del flusso di neutroni generato dal fascio di protoni (20 GeV) che interagisce al suo interno. I risultati preliminari sono stati confrontati con dati sperimentali e dati di simulazione ottenuti col codice FLUKA.

Attività di validazione delle librerie di lavoro a gruppi BUGJEFF311.BOLIB e BUGENDF70.BOLIB per lo schermaggio ed il danno da radiazione LWR

Il gruppo Dati Nucleare ENEA ha generato due librerie di sezioni d'urto accoppiate (47 n + 20 γ) con formato FIDO-ANISN, denominate BUGJEFF311.BOLIB e BUGENDF70.BOLIB, basate rispettivamente sulle librerie dati nucleari dell'OCSE-NEADB JEFF-3.1.1 e US ENDF/B-VII.0. La stessa struttura energetica a gruppi neutrone e fotone del ORNL BUGLE-96 (ENDF / B-VI.3) è stata adottata insieme con lo stesso formato di dati e la metodologia di elaborazione. Le librerie ENEA e ORNL, sono state specificamente concepite per applicazioni di schermaggio e di dosimetria del pressure vessel e contengono gruppi parametrizzati "*problem-dependent*" di sezioni d'urto preparate per applicazioni BWR e PWR. L'esperimento PCA-Replica "*acqua/ferro*" è stato considerato una prova significativa per convalidare le due librerie. Esso riproduce la geometria radiale dell'ex-core di un PWR ed è incluso nel database internazionale SINBAD di esperimenti di schermaggio per reattori nucleari. PCA-Replica è particolarmente adatta per testare le librerie citate poiché è stata specificamente concepita per testare il flusso calcolato di neutroni veloci nel simulatore di un pressure vessel in acciaio dolce di un PWR. I risultati ottenuti con la libreria dati BUGLE-96 rappresentano un confronto di riferimento affidabile perché questa è utilizzata con successo dal 1996 in tutto il mondo. Le librerie citate sono state alternativamente utilizzate nei calcoli di trasporto di sorgente fissa eseguiti in geometria cartesiana con il codice 3-D TORT-3.2 alle ordinate discrete (SN), compreso nel sistema deterministico di Codici di trasporto DOORS ORNL. Le sezioni d'urto utilizzate nei calcoli sono state elaborate con riferimento al file per dosimetria reattore AIEA IRDF-2002. I programmi ENEA ADEFTA-4.1 e BOT3P-5.3 sono stati impiegati rispettivamente per il calcolo delle densità atomiche isotopiche e per la generazione automatica delle maglie spaziali della griglia. I risultati integrali calcolati per dosimetria e per spettro sono stati confrontati con i corrispondenti dati sperimentali ottenuti usando dosimetri con soglia di attivazione [Rh-103 (n, n') Rh-103m, In-115 (n, n') In-115m e S-32 (n, p) P 32] per i dati dosimetrici e contatori proporzionali sferici riempiti d'idrogeno (tipo SP-2) insieme con uno scintillatore liquido organico (NE213) per i dati spettrali.

Aggiornamento delle librerie di decadimento contenute nel package per il calcolo dell'attivazione di materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico ANITA basandosi sui dati più recenti disponibili (EAF-2010, JEFF-3.1/RDD)

ANITA-2000 è un code package per la caratterizzazione dell'attivazione dei materiali esposti a irradiazione neutronica, rilasciato da ENEA all'OCSE-NEADB (NEA-1638). Il pacchetto contiene: a) il codice di attivazione ANITA-4M, basato sul codice originale sviluppato presso il JRC (Ispra), in grado di calcolare l'inventario radioattivo di un materiale esposto a irraggiamento neutronico, continuo o graduale; b) due librerie di sezioni d'urto di attivazione; c) la libreria dati di decadimento (FL1) contenente le quantità che descrivono le proprietà di decadimento dei nuclidi instabili e d) la libreria (FL2) contenente gli spettri di raggi gamma emessi dai nuclei radioattivi nella struttura ORNL-SCALE. I dati contenuti nelle librerie FL1 e FL2 del codice ANITA-2000 si basano sulla libreria dati

FENDL/D-2.0. Tenendo conto di un determinato interesse di ENEA e di Ansaldo Nucleare, le librerie FL1 e FL2 di ANITA-2000 sono state aggiornate sulla base della libreria dati di decadimento radioattivo JEFF-3.1.1. Questo lavoro ha richiesto la creazione di una serie di moduli di interfaccia al fine di elaborare e convertire i dati di decadimento JEFF-3 (in formato ENDF-6) nel formato richiesto dal codice ANITA-4M. Una validazione preliminare delle nuove librerie è stata effettuata attraverso il confronto di calcoli ANITA-4M con le misure del calore di decadimento elettrone-fotone e dell'attività di materiali attivati nell'esperimento Frascati Neutron Generator (FNG).

Le attività dei temi inseriti in questa task sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2013/076, RdS/PAR2013/077 e RdS/PAR2013/078.

a.2 Metodi Monte Carlo e deterministici per analisi di sicurezza nocciolo e stoccaggio di materiale fissile

Uso di codici metodi Monte Carlo per valutare il danno da radiazioni al *corium detector* durante uno scenario incidentale severo in un PWR

L'attività di trasporto di radiazione per mezzo di modellazione Monte Carlo ha proceduto lungo un doppio binario: sviluppo e applicazione. Lo sviluppo è stato diretto al calcolo delle risposte locali con tecniche di calcolo agli autovalori (come fatto per il core del reattore o negli array di stoccaggio di materiale fissile). La metodologia utilizzata sfrutta una tecnica di riduzione della varianza all'interno di un calcolo iterativo. Miglioramenti alla riduzione della varianza hanno sempre riguardato principalmente problemi con sorgenti fisse. Per contro, nell'ambito del presente metodo, si è considerata una riduzione della varianza attraverso uno schema iterativo per calcoli Monte Carlo agli autovalori. Tale modello riduce i dati memorizzati relativi alla energia e alla direzione della sorgente neutronica poiché si impiega la funzione distribuzione di generazione di fissione. Un'applicazione utile di tale metodo è il monitoraggio della posizione del corium in un reattore ad acqua pressurizzata durante gli scenari incidentali severi. L'attività è svolta in stretta collaborazione con IRSN (Istituto francese per la radioprotezione e la sicurezza). Ipotizzata la fusione del nocciolo, la posizione del corium è progressivamente rilevata per mezzo di cavi in fibra ottica, all'interno dei vari livelli di contenimento, posti a valle della parte attiva del nocciolo del reattore. Le valutazioni concernenti le dosi da irraggiamento consistono nella ricerca della soluzione di un problema di penetrazione profonda nei materiali tutto attorno alla regione ex-core, che coinvolgono alcuni aspetti che si adattano bene alla metodologia in esame..

Sezioni d'urto a due gruppi del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 1600 MWe finalizzate a calcoli di safety di nocciolo

Nella presente annualità sono state calcolate, con il codice di cella APOLLO2 versione 2.8-3.E, le sezioni d'urto efficaci a due gruppi energetici dei quattro tipi di elementi di combustibile 17x17 del primo ciclo di funzionamento di un reattore ad acqua pressurizzata da 1600 MWe. I dati geometrici e materiali della configurazione di riferimento sono tratti dal Final Safety Analysis Report della sezione EPR Application Documents della U.S. NRC e dalle specifiche contenute nel benchmark UAM della NEA. Le sezioni d'urto sono state calcolate al variare dei seguenti parametri: a) temperatura del combustibile, b) concentrazione di boro, c) densità del moderatore e d) bruciamento. Il metodo di risoluzione adottato per l'equazione del trasporto è stato quello delle Probabilità di Collisione Pij. I calcoli sono stati eseguiti con una libreria a 281 gruppi energetici di tipo SHEM basata su dati valutati JEFF-3.1. Le sezioni d'urto così calcolate verranno utilizzate per calcoli di safety di nocciolo PWR, previsti nella prossima annualità, con il codice CRONOS2.

Le attività dei temi inseriti in questa task sono documentate e dettagliate nei rapporti RdS/PAR2013/079 e RdS/PAR2013/078.

a.3 Validazione di codici incidentali e modelli fenomenologici per simulazione di transitori su reattore PWR da 900 MWe e per confronto con dati disponibili da prove sperimentali

La "in-depth analysis" negli incidenti base di progetto e negli incidenti severi, applicata ai reattori esistenti e futuri, richiede l'uso di strumenti numerici qualificati e provvisti di modelli capaci di simulare in modo coerente e affidabile fenomeni che potrebbero verificarsi durante le varie fasi di un incidente, a partire dall'evento iniziatore fino all'eventuale rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente. Questi modelli devono essere in grado di valutare l'efficacia delle misure di gestione di incidenti che potrebbero essere adottate per mitigare le conseguenze di tali incidenti.

Analisi di reflooding di mezzi porosi attraverso analisi di pre-test e di post-test a supporto del programma sperimentale PEARL per la validazione dei modelli presenti nei codici ICARE/CATHARE e/o ASTEC

Nel documento tecnico prodotto come risultato dei lavori su questo tema [RdS/PAR2013/081] vengono presentate le analisi di pre-test delle prove sperimentali di "debris bed reflooding" riferite alla apparecchiatura sperimentale PEARL. Si è fatto uso del codice ICARE/CATHARE nel quadro della cooperazione bilaterale tra ENEA e IRSN. L'obiettivo principale di questo lavoro è quello di sostenere IRSN nella definizione della geometria e delle condizioni al contorno delle prove che saranno effettuati in PEARL e, allo stesso tempo, di verificare la capacità e la consistenza dei modelli per i materiali porosi migliorati e recentemente implementati nell'ultima versione del codice.

Studi per la realizzazione di un nuovo modello, da inserire nel codice TRANSURANUS, per il calcolo della "plenum temperature"

Nuovi modelli di temperatura del plenum sono in fase di sviluppo per affinare la accuratezza del codice TRANSURANUS in condizioni stazionarie e incidentali (LOCA, RIA). Gli sforzi sono stati intrapresi per migliorare la descrizione del sottosistema "volume del plenum" per mezzo di modelli 2D. Allo scopo, sono stati sviluppati un modello di scambio termico 2D in transitorio e uno agli elementi finiti, implementato mediante il software commerciale COMSOL Multiphysics. Per confronto, ENEA ha introdotto nel codice TRANSURANUS il modello di temperatura del plenum presente in FRAPCON-3. Nel rapporto RdS/PAR2013/081 vengono descritti i modelli e le loro previsioni per una barra di combustibile PWR in condizioni di steady-state e riportate analisi preliminari dei risultati sugli effetti del rilascio di gas di fissione.

Verifica dei progressi e dell'affidabilità dei codici ASTEC e MELCOR attraverso il confronto dei risultati di calcolo riferiti ad una sequenza incidentale significativa per reattori PWR da 900 MWe

L'obiettivo riguarda l'analisi di scenari di "reflooding" del nocciolo degradato, con il codice integrale di calcolo ASTEC, durante una sequenza incidentale severa (SBLOCA) simulata con riferimento all'impianto TMI-2, nell'ambito della partecipazione dell'ENEA all'attività internazionale di Benchmark Exercise promossa dall'OCSE / NEA/CSNI. L'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di verificare la robustezza del codice nella simulazione delle più gravi condizioni incidentali e valutare la sua capacità di simulare al meglio la coolability del nocciolo a fronte di un ritardo d'intervento dei sistemi di raffreddamento di emergenza. L'attività è documentata nel rapporti RdS/PAR2013/082.

a.4 Metodi per verifiche di sostenibilità

Le attività programmate per questa task nella seconda annualità si sviluppano su due tematiche, con riferimento alla sostenibilità delle attività nucleari nazionali residue, a valle della discontinuità del programma nucleare italiano.

Valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica, security e interfaccia con la safety, sostenibilità del ciclo del combustibile

In continuità con le attività dei precedenti PAR e della prima annualità del PT 2012-2014, sono proseguite le attività di sviluppo e monitoraggio di metodologie che interessano trasversalmente aree essenziali e imprescindibili per le attività nucleari nazionali residue, ivi incluso lo sviluppo di reattori di nuova generazione: valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica, security e interfaccia con la safety, e altri elementi di sostenibilità del ciclo del combustibile. In particolare, è proseguita la partecipazione ai gruppi di lavoro GIF Proliferation Resistance and Physical Protection (PR&PP) e IAEA-INPRO (Collaborative Research Project PROSA), e l'applicazione della metodologia GIF PR&PP a reattori di nuova generazione.

Nel contesto NEA e IAEA, è continuato il contributo ENEA all'approccio metodologico per valutazioni di sostenibilità del ciclo del combustibile e analisi di opzioni di cicli avanzati. Nel quadro della ricerca di nuovi possibili indicatori per la sostenibilità del ciclo del combustibile, si è confrontata la radiotossicità a lungo termine dei rifiuti del combustibile con quella di ampi volumi di terreno attorno al deposito geologico. A livello internazionale, il Nuclear Security Summit che si è tenuto a l'Aia nel marzo 2014 ha rappresentato il momento topico, ma non è stato l'unico evento significativo. Sono proseguite, inoltre, le attività, iniziate nella precedente annualità, sull'interfaccia tra safety e security, con riferimento ai fattori scatenanti (sabotaggio o incidente) e conseguenze. Le attività svolte sono documentate nel rapporto RdS/PAR2013/083.

Contributo alla piattaforma IGD-TP e altre iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi

La piattaforma tecnologica europea "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform (IGD-TP)" (www.igdtp.eu), lanciata a novembre 2009 a Bruxelles, con lo scopo di coinvolgere tutti gli stakeholder, che sono interessati a contribuire al dibattito tecnico, scientifico, economico e sociale relativo allo smaltimento

geologico del combustibile nucleare esausto e dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita, continua a perseguire gli obiettivi che si è data nel suo Vision Report, declinando le attività, così come previste dalla relativa agenda strategica SRA, pubblicata nel 2011.

Nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA, l'ENEA ed il CIRTEN, che aderiscono alla piattaforma IGD-TP dal 2010, continuano a intervenire al dibattito tecnico scientifico attraverso la partecipazione ai forum annuali e alle attività dei working group e delle joint action. L'ENEA, contribuisce alla definizione e alla progettazione delle attività in ambito deposito geologico relative al monitoraggio dello stato di riferimento, al monitoraggio in fase operativa e al comportamento del radiocarbonio nei rifiuti radioattivi, attraverso la partecipazione ai forum della piattaforma ed ai gruppi di lavoro specifici. Il CIRTEN contribuisce al piano d'azione europeo per il conseguimento e fattibilità di un sistema di accreditamento facoltativo nel campo del mantenimento delle competenze, dell'istruzione e formazione nel settore del decommissioning, del RWs management e del deposito geologico. ENEA sintetizza annualmente tali attività in ambito IGD-TP, fornendo una visione strategica di quelle attività più strettamente collegate alla ricerca energetica italiana ed alle necessità del Paese. Queste attività sono documentate nel rapporto RdS/PAR2013/084.

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 questa seconda annualità è continuata l'attività di ricerca impostata nel PAR 2012 con particolare attenzione alla raccolta di coefficienti e parametri integrali per il calcolo "fast" del termine sorgente in reattori ad acqua leggera (LWR), allo studio integrale di sequenze BDBA su reattori di tipo PWR, selezionati tra quelli presenti in prossimità delle nostre frontiere, al calcolo e valutazione della sequenza incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima Dai-ichi, anche attraverso invio sul posto di un ricercatore per la miglior raccolta dati e informazioni (partecipazione a congresso sul tema sicurezza), al proseguimento e finalizzazione delle procedure per la realizzazione di un database esperto, alla verifica di fattibilità di una catena di calcolo fast-running, supportata da studi di sensitivity & uncertainty con l'uso del codice DAKOTA, all'applicazione di approcci di tipo probabilistico e deterministico per la stima del rischio di eventi incidentali esterni (vedi Fukushima). CIRTEN ha contribuito a queste attività con la partecipazione delle università di Pisa, Bologna, Roma "Sapienza" e Palermo.

b.1 Sviluppo di una metodologia per valutazioni di sicurezza in situazioni incidentali o di pre-emergenza

Le attività di ricerca condotte nell'ambito delle precedenti annualità, 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. Inoltre, a livello internazionale, il verificarsi dell'incidente di Fukushima ha messo in luce la necessità di munirsi di tutta una serie di dati, d'informazioni di sistema, di strumenti di calcolo integrale e meccanicistico, la cui applicazione, nel più breve tempo possibile dopo il verificarsi dell'ipotetico incidente, possa condurre a valutazioni utili per la stima dell'entità del danno immediato e del rischio associato al personale di centrale ed alla popolazione. Con riferimento alla realtà italiana, tale tipo di valutazione andrebbe effettuata per i reattori europei ed in particolare per quelli siti in prossimità dei nostri confini. 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 sugli eventi incidentali.

Raccolta di coefficienti e parametri integrali per il calcolo rapido di termini sorgente a partire da inventari di nocciolo per LWR

Nella attuale annualità è stata effettuata un'approfondita disamina della letteratura "open-source", di provenienza US-NRC, per la determinazione dei coefficienti e parametri integrali necessari alla stima rapida del termine sorgente di incidenti nucleari severi per reattori PWR e BWR utilizzanti combustibile UOx. Nel rapporto RdS/PAR2013/085 viene riportata la sintesi dell'analisi condotta sul contenuto dei documenti: NUREG-1228, NUREG-1465, NUREG-/CR-4722, NUREG-1150, NUREG-75/014, NUREG-1935, NUREG/BR-0150. Nel corso di tale analisi è stato possibile identificare quelle norme che riportano - per ciascuna delle due tipologie di impianti LWR - i coefficienti e i parametri integrali necessari alla stima rapida del termine sorgente in condizioni incidentali severe. Tale attività è la naturale prosecuzione di quella svolta nelle precedenti annualità (inventari di nocciolo e centrali frontaliere) con la finalità di stimare rapidamente il possibile rilascio in atmosfera come conseguenza di un

evento incidentale nucleare ad uno degli impianti che distano meno di 200 km dal confine nazionale. L'attività è svolta in collaborazione con CIRTEN-Università di Bologna.

Studio integrale di sequenze BDBA su reattori del tipo PWR da 900 MWe

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 i codici MELCOR ed ASTEC. Entrambi i codici consentono di simulare in modo integrale l'evoluzione temporale degli incidenti severi riguardanti un reattore della filiera LWR e di fornire l'inventario di materiale radioattivo eventualmente rilasciato sul territorio al confine impianto-sito. Tenendo conto del fatto che, dei 27 impianti nucleari frontalieri 26 sono reattori di potenza ed appartengono alla filiera dei reattori termici (20 del tipo PWR e 6 del tipo BWR), e uno, il PHENIX, è un reattore di ricerca del tipo veloce, appare evidente come l'analisi di possibili incidenti severi e la conseguente valutazione di potenziali rilasci da centrali frontaliere è una attività di strategica importanza per la previsione di eventuali scenari di rischio, la pianificazione dell'attività di soccorso e l'eventuale prevenzione al fine di ridurre al minimo i danni in caso di interessamento del territorio italiano.

Sulla base dei risultati ottenuti nella prima annualità del presente PAR, si è deciso di simulare un transitorio del tipo "short term Station Blackout (SBO)" con possibile rottura dei tubi a U del generatore di vapore (Steam Generator Tube Rupture, SGTR), indotta da stress termici su un PWR da 900 MWe. Questo scenario è di particolare interesse perché un SGTR indotto provoca un "by pass" del contenimento e una conseguente fuoriuscita di contaminanti radioattivi attraverso le valvole di sicurezza del sistema secondario. Inoltre il gruppo di ricerca del DEIM (Dipartimento di Energia, ingegneria dell'Informazione, e modelli Matematici) dell'Università di Palermo ha svolto un lavoro preliminare di raccolta di informazioni sulle potenzialità che hanno alcune piattaforme di simulazione ad oggi utilizzate per l'analisi della dispersione degli inquinanti e dei connessi impatti ambientali a seguito di un ipotetico rilascio radioattivo da un impianto nucleare soggetto a incidente severo.

Le attività sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/PAR2013/086.

Verifica di fattibilità di una catena di calcolo "fast-running" e studi di "Sensitivity & Uncertainty" con l'uso del codice DAKOTA

Il lavoro svolto è stato finalizzato alla descrizione dei metodi per lo svolgimento di attività di Verification & Validation di quantificazione delle Incertezze. In particolare sono state analizzate le caratteristiche di strumenti di calcolo allo stato dell'arte come RAVEN (Reactor Analysis and Virtual control ENviroment) e DAKOTA (Design Analysis Kit for Optimization and Terascale Applications), sviluppati dai laboratori americani di Idaho e Sandia, rispettivamente. E' stata valutata anche la possibilità di accoppiamento di tali tool con codici di sistema quali il RELAP5, testandone le capacità nel campo dell'analisi simultanea di diversi scenari incidentali. L'attività è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/087.

Proseguimento dell'attività relativa alla realizzazione del database esperto

Nella Task b.1 l'obiettivo è quello di realizzare 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 a reattori appartenenti alle centrali elettronucleari transfrontaliere (inquadrate in quelle 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, ed ai diversi scenari accidentali ipotizzabili, saranno resi disponibili, nei formati più opportuni, in modo da poter essere utilizzati come dati di input nei codici di trasporto e dispersione per il calcolo delle concentrazioni radioattive e delle dosi a carico della popolazione. 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 tutta una serie di dati, informazioni di sistema, strumenti di calcolo integrale e meccanicistico, in modo da essere preparati, nel più breve tempo possibile dal verificarsi dell'incidente, ad operare valutazioni rapide di una prima stima dell'entità del danno immediato e del rischio associato al personale di centrale ed alla popolazione. In tale contesto, nel corso della scorsa annualità, è stato realizzato ed installato su un server di prova presso in Centro ENEA di Bologna, il database dei dati nucleari, basato su motore PostgreSQL, contenente le informazioni relative:

- ai siti, ai reattori ed alle diverse configurazioni di combustibile delle centrali nucleari transfrontaliere di Francia, Svizzera, Germania e Slovenia;
- alle proprietà dei radionuclidi considerati;
- alle curve di decadimento della potenza dei reattore e dei radionuclidi stessi;
- agli inventari calcolati sulla base delle diverse configurazioni di combustibile dei reattori presi in esame.

In parallelo, è stato realizzato, mediante moduli html/php, il software di gestione dei dati allo scopo di permettere, in maniera facile ed immediata, la selezione, la visualizzazione e l'eventuale esportazione delle informazioni memorizzate nel database stesso. Il software di gestione consente di procedere all'aggiornamento, da parte degli operatori, delle informazioni di base in esso contenute a all'inserimento di nuovi dati (ad esempio nuovi reattori nucleari) nelle tabelle di cui esso si compone. Per mezzo del software di gestione, il database è accessibile e consultabile da qualsiasi dispositivo (personal computer, tablet, ecc.) collegato alla rete internet, previa autenticazione tramite le credenziali assegnate, all'indirizzo http://192.107.65.184/tsor/pagine/login.php. Ad oggi, il software consente, oltre alla gestione delle tabelle contenenti i dati di base, di selezionare la situazione relativa ad un determinato reattore e ad una specifica configurazione di combustibile e, di conseguenza, di visualizzarne i valori di decadimento e di inventario ed, eventualmente, di esportare tali informazioni sul proprio PC come file di testo o file excel di formato opportuno.

L'attività descritta è documentata nel rapporto RdS/PAR2013/088.

b.2 Applicazione di metodologia PSA e DSA del tipo "Risk-Informed" per la stima del rischio di eventi esterni

Le attività programmate per questa task hanno come obiettivo l'identificazione ed analisi degli aspetti specifici relativi all'analisi probabilistica di sicurezza, come evidenziati dall'incidente di Fukushima, implementazione dei relativi modelli nell'approccio probabilistico, calcoli deterministici per valutare la risposta degli impianti relativamente alla funzione di contenimento a fronte di situazioni incidentali come l'incidente prolungato di Station BlackOut.

Le varie lacune relative al corrente approccio PSA (Analisi Probabilistica di Sicurezza), come emerge dall'incidente di Fukushima, sono state identificate e analizzate. Queste includono la combinazione di eventi esterni come eventi scatenanti, il rischio relativo a siti con molte unità, gli scenari di incidenti rilevanti connessi con le prestazioni dei sistemi di sicurezza, come ad esempio per la rimozione del calore, per lunghi periodi di tempo e il rischio associato a piscine del combustibile esaurito. Questa attività è stata specificamente rivolta alla valutazione dei rischi correlati a seguito di un grave evento naturale esterno. A questo scopo alcune nozioni fondamentali per implementare i modelli di PSA, per includere un pericolo proveniente dall'esterno, ad esempio, il terremoto e lo tsunami nell'incidente di Fukushima, e gli eventi interni iniziati da cause esterne, ad esempio, il fuoco indotto dal sisma, vengono proposti e discussi per la loro incorporazione all'interno della struttura di valutazione del rischio.

Lo studio è comprensivo di un esempio illustrativo. Come parte degli studi probabilistici di sicurezza di tipo "risk-informed", sono stati effettuati anche dei calcoli deterministici al fine di valutare la risposta dell'impianto in relazione alla funzione di contenimento e dei "tempi chiave" di fronte a certe situazioni come l'evento incidentale di "Station Blackout". Si è fatto uso di un modello di contenimento in MELCOR per calcolare la risposta del sistema e per supportare i criteri di successo di analisi probabilistica e caratterizzazione della risposta del sistema (ad es. temperatura, pressione) ed i momenti critici. L'analisi ha lo scopo di fornire informazioni per lo sviluppo di tutte le strategie, i tempi e le azioni alternative per la gestione degli incidenti. I problemi evidenziati nel presente studio sono da affrontare per utilizzare i risultati del PSA in modo appropriato nei futuri processi decisionali di conoscenza del rischio. In particolare, la valutazione del rischio di pericoli esterni è richiesta e deve essere utilizzata come parte integrante di PRA (Analisi probabilistica di rischio) per i nuovi reattori e per quelli attualmente in funzione.

Il processo "Risk-Informed" richiede, dunque, una forte interconnessione tra l'approccio deterministico e quello probabilistico, al fine di valutare correttamente e analizzare le prestazioni degli impianti nucleari (valutazione della sicurezza a breve e lungo termine). Quando si tratta di valutazione della sicurezza a breve termine, l'uso di un approccio deterministico, sostenuta da ipotesi conservative, può portare a un miglioramento della sicurezza e ad una più razionale allocazione delle limitate risorse disponibili. A questo scopo e alla luce degli eventi che si sono verificati in Giappone, la vulnerabilità del sistema e dei componenti fondamentali funzioni di sicurezza, come la costruzione esterna di contenimento della centrale nucleare, deve essere analizzata in condizioni base di progetto, come l'esposizione ai rischi esterni, in caso di prolungata perdita di potenza e di raffreddamento idrico. Pertanto, l'obiettivo della stima dei margini di sicurezza con l'approccio deterministico, è stato quello di valutare la robustezza di un impianto esistente in termini di caratteristiche di progettazione e procedure contro l'impatto di eventi estremi, come il terremoto e la conseguente inondazione dovuta allo tsunami, concentrandosi sull'adempimento delle funzioni fondamentali di sicurezza.

I rischi da sisma e da tsunami sono presentati e discussi, in modo completo e sistematico, con riferimento ai criteri di accettazione adottati per i reattori di seconda generazione. Sono anche state identificate le vulnerabilità d'impianto e le azioni necessarie per migliorare l'impianto e per ottimizzare gli interventi di mitigazione. Sono infine riportate importanti considerazioni e raccomandazioni per il miglioramenti della sicurezza.

Le attività sono documentate e dettagliate nel rapporto RdS/PAR2013/089.

b.3 Calcolo e valutazione della sequenza incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima Dai-ichi. Identificazione delle principali criticità per l'avvio di azioni di "Accident Management" con riferimento alle centrali prossime ai confini nazionali"

Le attività programmate si sviluppano su due tematiche relative all'analisi "best estimate" con RELAP della sequenza Incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima e alla realizzazione di un input-deck MELCOR per lo studio integrale di sequenze incidentali BDBA su reattori ad acqua bollente (BWR) tipo MARK1.

Sono state svolte attività riguardanti lo sviluppo e la validazione di nodalizzazioni di reattori ad acqua bollente mediante codici di calcolo per l'analisi di incidenti severi (MELCOR e RELAP/SCADPSIM). Dopo aver evidenziato le necessità di disporre di tali strumenti di calcolo per l'analisi di reattori BWR transfrontalieri, è stata analizzata la sequenza incidentale occorsa all'Unità 1 dell'impianto nucleare di Fukushima Dai-ichi, evidenziandone le fasi salienti. Si è poi provveduto allo sviluppo preliminare di una nodalizzazione MELCOR e di uno sviluppo completo di una nodalizzazione RELAP/SCDAPSIM. Con quest'ultima, si è svolta un'analisi preliminare dell'incidente occorso all'impianto giapponese, al fine di testare le capacità del codice e di ottenere dati di riferimento da poter confrontare, in un secondo momento, con i risultati del codice MELCOR. Infine sono state evidenziate le possibili azioni di Accident Management che potranno essere studiate.

L'attività sono descritte in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2013/090.

c. Sperimentazione e calcolo in appoggio agli studi sulla sicurezza

In questa seconda annualità, le attività sono state indirizzate principalmente alla fase conclusiva degli studi di fattibilità e valutazione costi di una nuova configurazione della facility integrale SPES3, allo studio per la sperimentazione di un sistema per la rimozione del calore residuo e alla validazione e verifica della risposta dei codici CATHARE2 e TRACE con riferimento al programma sperimentale SPES2. CIRTEN ha contribuito a queste attività con la partecipazione dell'Università di Palermo e dei Politecnici di Torino e Milano, contributi sono stati anche da SIET.

c.1 Studi relativi alla simulazione integrale di sistema presso gli impianti SIET

Mantenere e potenziare le infrastrutture sperimentali esistenti, così come preservare la capacità di progettazione ed interpretazione di campagne sperimentali, è essenziale sia per le verifiche di sicurezza dei reattori attuali, sia per confermare la validità dei principi su cui si basa il progetto di sicurezza dei reattori innovativi. Tale obiettivo è stato perseguito attraverso le attività realizzate nelle tematiche descritte nel seguito.

Analisi di fattibilità e costi di una nuova configurazione della facility SPES3

Questa tematica ha riguardato la possibilità di completare la facility SPES3 (simulatore integrale di SMR), parzialmente realizzata presso i laboratori SIET nel corso dei PAR precedenti, che permetterebbe, oltre alla valutazione dei principi di sicurezza intrinseca, che sono alla base del "safety by design" dei reattori innovativi, la V&V (validazione-verifica) dei codici termoidraulici di sistema utilizzati per la simulazione di impianto dei reattori. Nella passata annualità era stata definita una configurazione alternativa che consentisse un risparmio sui costi di completamento attraverso l'utilizzo di componentistica già disponibile della facility SPES2 (canale di potenza e pompe primarie), pur garantendo la rappresentatività della facility nella valutazione di concetti per la sicurezza intrinseca. Nella presente annualità SIET ha preso in esame la fattibilità tecnico-economica di tale configurazione, verificando che i componenti riutilizzabili di SPES2 hanno caratteristiche tecniche idonee e redigendo un progetto di massima in cui sono definite le connessioni e le linee di collegamento necessarie. SIET ha anche individuato una problematica di simulazione termo-idraulica legata alla presenza di maggiori perdite di carico nel tratto riscaldato del canale di potenza, che richiederebbe ulteriori analisi con codici di sistema (RELAP5, TRACE).

Da un punto di vista economico, il nuovo progetto prevede un risparmio di circa il 35% rispetto a quanto calcolato nella scorsa annualità per la configurazione originale, con analoga tempistica per la realizzazione dell'impianto. Nonostante tale risparmio, il costo residuo di 5582 k€ rende problematico perseguire il completamento di SPES3 nell'attuale programma triennale.

Informazioni sull'analisi di fattibilità e costi della nuova configurazione della facility sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/091.

Studio per la sperimentazione di un sistema per la rimozione del calore residuo in LFR

L'importante problematica della regolazione della potenza estratta dal sistema di rimozione del calore di decadimento nei reattori refrigerati a piombo è stata oggetto di studio di questa tematica. L'alta temperatura di solidificazione del piombo (327,5 °C) richiede la regolazione delle performance dello scambio termico per evitare la solidificazione ed il conseguente intasamento dei tubi dello scambiatore. Nel sistema attualmente previsto per il progetto di riferimento di un reattore dimostrativo (ALFRED), ANSALDO ha proposto di regolare le performance dello scambiatore, nel quale la potenza residua del reattore viene rimossa tramite condensazione di vapore in tubi immersi in una piscina di acqua fredda, degradando il coefficiente di scambio termico nei tubi tramite iniezione di gas incondensabile. Questa soluzione richiede una conferma sperimentale. Nella corrente annualità la SIET ha pertanto effettuato uno studio di fattibilità tecnica integrato da valutazioni economiche relative a tempi e costi di tale attività sperimentale. Tale studio ha prodotto un progetto preliminare dell'impianto sperimentale che potrebbe essere utilizzato per una verifica del sistema proposto in scala 16:6. Inoltre la SIET ha effettuato la valutazione dei costi sia per questa scala di riferimento, sia per una scala ridotta pari a 16:2, che porterebbe ad una riduzione di circa il 30% dei costi. Un'accurata valutazione tra il beneficio di un minor costo ed una penalizzazione in termini di rappresentatività dell'impianto consentirà di definire le specifiche dell'impianto da realizzare. L'attività è documentata e descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/092.

Validazione e verifica di CATHARE2 e TRACE sul programma sperimentale SPES2

Le attività di validazione e verifica dei codici termo-idraulici di sistema hanno riguardato le analisi di post-test svolte dall'ENEA (CATHARE) e dall'Università di Palermo (TRACE) sui test della campagna sperimentale condotta sul finire degli anni 90 sulla facility SPES2 (simulatore dell'impianto a maggior sicurezza intrinseca e passiva AP600). Tale attività risulta importante al fine di approfondire le conoscenze inerenti le fenomenologie rilevanti per il progetto della sicurezza nei sistemi innovativi, in genere dotati di sistemi di sicurezza di tipo passivo. Tali sistemi, anche alla luce dell'evento di Fukushima, rivestono un ruolo di forte interesse internazionale.

In particolare l'ENEA ha simulato, tramite l'impiego del noding CATHARE, un evento incidentale originato da una rottura di due pollici sulla linea di iniezione B dei sistemi di emergenza (Direct Vessel Injection). Tale lavoro ha consentito di mettere in luce la necessità di approfondire e migliorare il modello CATHARE fin qui sviluppato, pensando ad esempio alla possibilità di introdurre al suo interno alcuni moduli, quali il modello tridimensionale del downcomer che, pur allungando i tempi di calcolo, potrebbe fornire risultati più rispondenti ai dati sperimentali. Ciò potrebbe essere utile a superare le difficoltà incontrate, che sono anche legate alle seguenti carenze nei dati sperimentali:

- descrizione puntuale delle perdite di carico distribuite nell'intero circuito;
- non esatta conoscenza delle perdite termiche dell'impianto.

L'Università di Palermo ha simulato, tramite l'impiego del noding TRACE, il transitorio di rottura di 2" sulla linea di collegamento tra Cold Leg e la Core Make-up Tank. I risultati di questa simulazione sembrano essere in buon accordo con i dati sperimentali disponibili. In particolare, è stata effettuata un'approfondita analisi degli effetti indotti sui risultati della simulazione da una più corretta stima della distribuzione delle perdite, sia di carico che termiche. Ciò ha permesso di evidenziare la buona capacità presentata dal modello TRACE di predire il comportamento globale dell'impianto nel test di riferimento, anche tenendo in conto le particolari asimmetrie che il test ha evidenziato. Questa attività richiede un approfondimento, sia per quanto riguarda il miglioramento dei modelli, in particolare per il codice CATHARE, sia aumentando il numero di test presi in esame per la V&V.

Il lavoro svolto è descritto nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/093.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori Innovativi

Questo obiettivo è stato sviluppato in completa continuità con i risultati raggiunti nel corso dei PAR precedenti. Relativamente alla strumentazione, si è operato per superare i limiti di utilizzo dello Spool Piece (SP) sviluppato per la misura della portata bifase, mentre gli studi effettuati per lo sviluppo di modelli per lo scambio termico sono stati applicati all'analisi delle prestazioni di scambiatori innovativi.

Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece per stimare e ridurre l'incertezza sulla misura della portata

SIET ha svolto un'analisi approfondita di tutti i dati sperimentali ricavati nelle varie campagne di prova dello Spool Piece, con lo scopo di definirne potenzialità e limiti di utilizzo per impiego in sperimentazioni su sistemi integrali tipo SPES-3. Considerando una matrice di prove tridimensionale portata-titolo-pressione, è stato possibile definire le zone in cui lo Spool Piece non può essere impiegato per limiti tecnici e le zone in cui invece può essere

impiegato. Inoltre, sulla base dell'analisi dei dati precedentemente acquisiti e di nuovi test di stabilità, è stata valutata in modo accurato l'incertezza introdotta dai diversi strumenti dello spool piece nella misura del parametro "portata massica". Poiché questa incertezza risultava eccessivamente elevata per alcune zone di funzionamento, sono state individuate le principali cause e proposti dei miglioramenti alla strumentazione che potranno ridurre l'incertezza della misura al di sotto del 15%. Informazioni dettagliate sull'attività svolta sono contenute nel rapporto RdS/PAR2013/094.

Modellazione di uno Spool Piece per la stima dei parametri caratteristici dei deflussi bifase

La modellazione dello Spool Piece per la stima dei parametri caratteristici di un deflusso bifase è stato l'oggetto di questa tematica sviluppata dal Politecnico di Torino. Il dispositivo preso in considerazione è costituito da un tubo di Venturi e dalla sonda ad impedenza sviluppata dalla SIET per la stima della frazione di vuoto. I deflussi di interesse sono quelli ad elevata frazione di vuoto, con flow pattern che coinvolgono il moto anulare, il moto anulare – disperso, il moto stratificato. Per integrare la matrice sperimentale ottenuta dal Politecnico di Torino nella precedente annualità con la sonda in configurazione verticale, è stata condotta una campagna sperimentale con la stessa, montata in configurazione orizzontale, composta di 30 prove sperimentali in regime di "wet gas" (grado di vuoto superiore al 98%). Sulla base della matrice completa, si è applicato un approccio meccanicistico nella descrizione dei deflussi per la modellazione dello SP. Tale approccio ha portato alla stima "best estimate" delle portate delle singole fasi, con l'ausilio di modelli a zero o al più monodimensionali e correlazioni semiempiriche atte a descrivere i fenomeni nella sezione di deflusso. I risultati ottenuti dall'interpretazione dei dati sperimentali mostrano che, allo stato attuale della ricerca, la sonda a impedenza è molto interessante per il riconoscimento del flow pattern, ma non consente di realizzare un segnale che permetta di caratterizzare il comportamento del Venturi. L'attività è dettagliata e documentata nel rapporto RdS/PAR2013/095.

Analisi comparata delle prestazioni di scambiatori di calore/generatori di vapore compatti per la rimozione della potenza in modo passivo

In continuità con gli studi effettuati nelle precedenti annualità sulla modellistica delle fenomenologie presenti in generatori di vapore e scambiatori di calore innovativi, si sono analizzate le prestazioni di tali scambiatori in diverse configurazione per l'utilizzo in progetti di reattori nucleari futuri. In particolare, sono state studiate e confrontate due possibili configurazioni: una configurazione a microcanali ed una a canali elicoidali. Il confronto è stato effettuato in condizioni stazionarie e in condizioni incidentali tramite l'uso del codice T/H di sistema RELAP5. Come progetto di riferimento, su cui confrontare le due configurazioni, si è preso a riferimento il I2S-LWR project di Georgia-Tech. Per le analisi di stazionario sono stati confrontati due scambiatori progettati per rimuovere ¼ della potenza del reattore, sia a piena potenza che a potenza ridotta. Per le analisi in condizioni incidentali si è considerato un incidente di Station Black-out seguito da scram del reattore. In questo caso i due scambiatori sono stati confrontati considerando due possibili soluzioni per il pozzo termico del sistema DHR: condensatore in piscina di acqua fredda e scambiatore di calore in aria. Dall'analisi in stazionario è stato possibile concludere che gli scambiatori a microcanali danno la possibilità di rimuovere la potenza termica con un maggior grado di compattezza, ma presentano perdite di pressione sul primario decisamente superiori. Questo punto influenza sia la stabilità alle variazioni di carico che le prestazioni in circolazione naturale durante il funzionamento come sistema DHR. In entrambe le situazioni gli scambiatori elicoidali garantiscono più stabilità e prestazioni superiori. Altri studi sono tuttavia necessari per migliorare la simulazione dello scambiatore a microcanali, per valutare gli effetti delle geometrie e per estendere il confronto ad altre configurazioni.

Informazioni sull'attività svolta sono contenute nel rapporto RdS/PAR2013/096.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

L'ENEA, sin dalla sua costituzione, svolge attività di ricerca e sviluppo nel settore della fissione nucleare. Attualmente le attività tecnico-scientifiche in questo campo sono focalizzate principalmente sulla ricerca e sviluppo di sistemi nucleari avanzati per impianti produttivi innovativi, sul mantenimento e ulteriore sviluppo delle competenze nel campo della sicurezza nucleare (safety e security). L'ENEA svolge, inoltre, attività di formazione e informazione protese ad incrementare le competenze di settore e le conoscenze del pubblico, tecnico e generico, sui vari aspetti dell'energia nucleare al fine di diffondere, per quanto possibili, le basi concrete su cui poggia il settore e tutta una serie di informazioni legate ai concetti di rischio e di sicurezza.

Le principali attività nazionali portate avanti nell'ambito di programmi nazionali di ricerca e sviluppo, sono finanziate dal Ministero dello Sviluppo Economico, in particolare nell'ambito Accordo di Programma relativo alla Ricerca di Sistema Elettrico, e dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Le attività internazionali

fanno riferimento principalmente ai progetti europei finanziati dall'Euratom e alla partecipazione a gruppi e comitati di grande rilevanza in ambito OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), NEA (Nuclear Energy Agency), CSNI (Committee on the Safety of Nuclear Installations) e IAEA (International Atomic Energy Agency).

La diffusione dell'informazione scientifica disponibile a seguito delle ricerche svolte in ambito dell'AdP è svolta in collaborazione con l'Università e l'Industria, attraverso pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali e internazionali, il sito web ENEA (si vedano, in particolare, le pagine dedicate alla Ricerca Sistema Elettrico e al FOCUS fissione nucleare) nonché seminari e convegni. Fatto rilevante da evidenziare è che l'intero contenuto pubblicato è di libera consultazione.

Il processo della comunicazione scientifica, inteso come procedura di scambio e di diffusione dell'informazione all'interno della comunità degli addetti ai lavori, è sempre stato curato con molta attenzione, sia da parte dei singoli ricercatori, sia dalle organizzazioni di appartenenza di detti ricercatori, al fine di promuovere quella che in gergo viene detta "collaborazione tra enti e ricercatori". Le finalità principali della comunicazione scientifica sono quelle di indicare, a livello nazionale e internazionale, lo stato d'avanzamento di una data ricerca, le difficoltà ancora esistenti, il livello di confidenza raggiunto e, di rimando, le incertezze con cui i risultati della ricerca vengono comunicati. Tutto questo processo avviene con linguaggio non comune, che gli addetti ai lavori colgono prontamente e di cui, a loro volta, si servono per comunicare le proprie osservazioni al riguardo della comunicazione trasmessa e l'accettazione del lavoro oppure critiche e suggerimenti in caso di non completa condivisione o approvazione dei risultati comunicati. Come detto, questa forma di processo comunicativo è molto tecnica e di difficile, se non addirittura di impossibile comprensione da parte dei non addetti ai lavori. A questa importante funzione di comunicazione "tra esperti", se la finalità della ricerca è portarla a conoscenza del più vasto numero di persone possibile, se ne deve necessariamente aggiungere un'altra, per niente facile e immediata, che è quella della divulgazione scientifica, diretta a raggiungere, con un linguaggio più semplice, un pubblico molto più ampio di quello degli addetti ai lavori.

Uno degli scopi prefissati nell'ambito dell'AdP e in particolare nella linea progettuale sullo *sviluppo di competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare*, è di riuscire a riassumere, in rapporti tecnici di sintesi, i contenuti scientifici delle attività di ricerca svolte evitando di presentare pagine piene di formule ed equazioni, incomprensibili ai più, in modo da attrarre l'attenzione di differenti tipologie di lettori, tra cui i rappresentanti del mondo politico, industriale e dell'istruzione superiore e universitaria. In estrema sintesi, un grande sforzo è stato compiuto per veicolare un contenuto scientifico in senso stretto confezionamento uno strumento destinato al grande pubblico ma, allo stesso tempo, con la cura di non esagerare con la semplificazione dei contenuti, per evitare il rischio di una volgarizzazione o banalizzazione della tematica scientifica.

La forma di divulgazione dell'informazione più concreta, immediata e rilevante per chiunque voglia consultare i contenuti, è quella dell'emissione di rapporti tecnici in cui sono condensati i risultati delle ricerche condotte nell'annualità.

L'ENEA si è impegnata a diffondere le attività di ricerca svolte nell'ambito dell'Accordo di Programma, linea progettuale LP1, seconda annualità, anche attraverso l'organizzazione di un kick-off meeting, a cui hanno partecipato tutti i soggetti interessati allo sviluppo delle attività, in particolare i ricercatori di ENEA, CIRTEN e SIET.

Nel dicembre 2013, verso la fine del primo trimestre della seconda annualità, si è svolto un seminario a cui sono stati invitati i principali contributori (ENEA, CIRTEN e SIET) per discutere collegialmente i risultati conseguiti nei primi 12 mesi del progetto e individuare la miglior via per mettere in campo successive azioni al fine di ottimizzare le attività di ricerca da svolgere durante le successive annualità.

Al fine di valutare lo stato di avanzamento delle attività previste per i vari contributori nella seconda annualità del PAR, ad aprile 2014 si è svolto un workshop a cui sono stati invitati i principali contributori per presentare e discutere collegialmente il lavoro programmato. In quest'occasione, si è svolto inoltre un evento finalizzato alla comunicazione e diffusione dei risultati.

E' prevista, alla fine delle attività della seconda annualità, la convocazione di un workshop di libero accesso in cui i referenti di task descriveranno, i principali traguardi conseguiti e delineeranno i percorsi della ricerca da seguire affinché nella prossima annualità, fase finale della ricerca triennale dell'AdP PAR 2012-2014, si possa giungere alla conclusione concreta e con esito positivo di tutti gli obiettivi prefissati.

Maggiori dettagli sui contenuti dei lavori e dei momenti d'incontro sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/097.

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 denominato ALFRED e oggetto del consorzio internazionale FALCON ("*Fostering Alfred Construction*"), cui hanno aderito Ansaldo Nucleare, ENEA e ICN (Romania).

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.

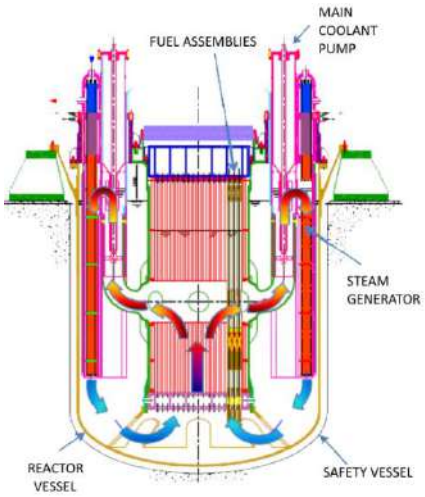


Figura 284. Sezione del vessel del reattore ALFRED

a. Progettazione di Sistema e Analisi di Sicurezza

a.1 Progettazione di sistema

Relativamente agli studi di sostenibilità sui sistemi LFR e SMR-LFR di IV generazione, si sono analizzate diverse strategie nei processi di separazione e di trasmutazione degli attinidi per ottenere la chiusura del ciclo del combustibile, attraverso l'utilizzo ottimale delle risorse naturali e la minimizzazione dei rifiuti radioattivi da disporre nel deposito geologico. In particolare sono state valutate le differenze in termini tecnici ed economici tra l'impiego di soli LFR e di LFR abbinati a sistemi sottocritici tipo ADS (Accelerator Driven System) per l'implementazione del ciclo chiuso del combustibile attraverso il riprocessamento e riutilizzo dei transuranici (TRU) detto "Partitioning & Transmutation"(P&T). I risultati prodotti nell'ambito del Task a.1 sono descritti nel report RdS/PAR2013/013.

Si è analizzata l'effettiva applicabilità di una strategia di P&T nell'ambito dello scenario nucleare della Romania dove, attualmente, sono operativi due reattori CANDU e altre due unità stanno per entrare in produzione; oltre a ciò la Romania si è resa disponibile ad accogliere sul suo territorio la costruzione del reattore ALFRED che rappresenta il prototipo dimostrativo di piccola taglia della filiera di reattore veloce critico, refrigerato al piombo, che raggiungerà la maturità industriale col reattore di potenza ELFR (European Lead Fast Reactor) sviluppato nell'ambito del progetto EU-FP7-LEADER.

Oltre ad un primo scenario, incentrato solo sulla filiera CANDU, sono stati analizzati altri due scenari a ciclo chiuso uno basato sull'impiego di LFR ed un terzo dove alla filiera LFR è affiancata una composta di ADS destinata all'eliminazione degli attinidi minori (MA) prodotti dal parco di reattori rumeno.

Da risultati ottenuti si evince che per raggiungere l'obiettivo della chiusura del ciclo risulta necessario che la Romania stabilisca delle sinergie con altri stati, dato che i propri stock di Pu e MA non le consentono di far funzionare i reattori LFR e ADS necessari a tale scopo.

Sono state inoltre analizzate, in via preliminare, configurazioni del nucleo del reattore che soddisfano criteri di maggiore sicurezza contro la proliferazione. Si sono effettuate simulazioni neutroniche volte a valutare l'efficacia delle diverse strategie di gestione del combustibile, confrontandole in termini di sostenibilità ambientale, livello della sicurezza ed efficienza del sistema.

In relazione alle attuali linee di ricerca su sostenibilità del ciclo del combustibile e reattori veloci di IV generazione, l'attività svolta ha analizzato il comportamento del reattore ELFR sotto il profilo neutronico e del bruciamento del combustibile, mediante codice SERPENT (codice Montecarlo di trasporto neutronico). L'analisi effettuata ha permesso di definire l'evoluzione dei parametri d'interesse del reattore (fattore di moltiplicazione, flusso, spettro energetico e massa dei diversi nuclidi di interesse, ecc.) nel corso dei cinque anni di bruciamento del combustibile. Il lavoro svolto si è focalizzato sulla modellazione dell'intero nocciolo del reattore, comprendente le tre zone di combustibile (INN, OUT e EXT), le barre di sicurezza e di controllo, gli elementi dummy, il vessel e il piombo circostante. Inoltre è stata modellata la barretta di combustibile nella sua lunghezza, includendo anche le regioni sopra e sotto la zona attiva.

Per quanto riguarda l'analisi di bruciamento, il nocciolo è stato diviso in tre zone radiali (corrispondenti alle tre diverse zone di combustibile) e in dieci zone assiali, simulando un tempo di residenza all'interno del reattore di 5 anni. Per ogni passo temporale, è stato possibile analizzare:

- la criticità, ovvero il fattore di moltiplicazione neutronica;
- l'andamento dei principali isotopi;
- lo spettro neutronico;
- il flusso in senso radiale e assiale.

Il modello sviluppato permette di simulare svariati scenari di bruciamento, mettendo a disposizione uno strumento per le analisi di sostenibilità volti a massimizzare l'utilizzo del combustibile e a minimizzare le scorie nucleari con i sistemi veloci refrigerati a piombo.

Nell'ambito dell'attività sono state inoltre avviate delle analisi economiche relative al DEMO-LFR ALFRED, tramite la determinazione dei costi seguendo una metodologia bottom-up [rapporto RdS/PAR2013/014]. Una prima stima delle suddette grandezze era già disponibile come risultato di azioni svolte all'interno del progetto LEADER, prendendo come riferimenti questi risultati, nell'ambito delle attività del PAR sono stati definiti più accuratamente i valori delle componenti più critiche che concorrono a determinare il costo totale del reattore. Questo grazie ad un'analisi dettagliata condotta anche in base a consultazione con tecnici dell'Ansaldo Nucleare, della Mangiarotti SpA, del Nuclear Research Institute (Rep. Ceca) e del Institute for Nuclear Research Pitesti (Romania).

Le componenti i cui costi sono stati rideterminati comprendono:

- Opere Civili
- Pompe del primario
- Sottosistemi del circuito secondario (Turbina + Alternatore, Condensatore e Torri di raffreddamento).

Adottando il nuovo valore del costo di costruzione di ALFRED è stato effettuato anche il ricalcolo del costo unitario dell'energia elettrica prodotta da esso.

a.2 Progettazione nocciolo LFR

Relativamente alla progettazione del nocciolo LFR e all'utilizzo del reattore TAPIRO in supporto a ciò, nella precedente annualità si è provveduto allo sviluppo e la validazione del modello Monte Carlo dettagliato del reattore TAPIRO. Nella presente attività tale modello è stato utilizzato come strumento di progettazione di esperienze in supporto alle attività Generation IV sui reattori veloci a piombo. Si è quindi provveduto alla progettazione di una facility per misure di trasporto neutronico in piombo nel reattore TAPIRO. Il lavoro si è articolato in tre linee:

1. validazione del modello Monte Carlo di TAPIRO nel vano colonna termica confrontando le sue previsioni in aria con nuove misure appositamente effettuate in questa attività;
2. previsione delle caratteristiche del trasporto neutronico in piombo nel vano colonna termica mediante il modello Monte Carlo di TAPIRO. Studio parametrico delle dimensioni ottimali della facility. Sensitività del sistema alle variazioni della composizione isotopica e della densità del piombo. Progettazione concettuale della facility con proposta di layout di massima;
3. studio di rappresentatività della facility di trasporto in piombo rispetto ai parametri dei reattori di riferimento mediante l'uso del codice ERANOS e della Teoria Generalizzata delle Perturbazioni.

A seguito del lavoro svolto si può evincere quanto segue:

- Il modello Monte Carlo di TAPIRO conferma anche in questa attività un buon accordo con i dati sperimentali. Sarebbe auspicabile una campagna sperimentale per confermare le stime emerse dalle simulazioni in piombo.
- Un'analisi parametrica ha permesso di stabilire le dimensioni ottimali per avere una modalità di trasporto neutronico simile a quella che si avrebbe riempiendo completamente con piombo il vano colonna termica. Le perturbazioni di flusso e spettro neutronico indotte dalle variazioni di composizione isotopica e di densità del piombo divengono (3-15%) importanti solo quando il trasporto si esplica su lunghe distanze e grossi volumi.
- Si è fornito uno schema di progettazione concettuale per la facility, definendo i parametri di progettazione che, se confermati da esperienze in piombo, possono costituire la base per una futura progettazione dettagliata.
- I coefficienti di correlazione delle grandezze integrali (rapporti di tassi di fissione) pertinenti alla struttura della facility rispetto all'effetto di vuoto del piombo in ELSY (European Lead Fast Reactor) risultano maggiori

del valore della correlazione risultante, in uno studio simile, nel confronto tra il reattore GUINEVERE e ELSY in cui la quantità integrale considerata per entrambi era l'effetto di vuoto del refrigerante piombo.

- Questi primi risultati dello studio sembrano confermare il ruolo importante che una facility sperimentale realizzata sul TAPIRO può rivestire come strumento utile per la progettazione della prossima generazione di reattori veloci a piombo.

I risultati prodotti sono descritti nei report RdS/2014/015 e RdS/2014/016.

Relativamente alla validazione della metodologia di calcolo perturbativo GPT implementata nel codice ERANOS attraverso il confronto con i risultati ottenuti con metodi diretti, è stata avviata un'attività avente come scopo la validazione e integrazione di una procedura di calcolo già esistente (modulo MECCYCO) per calcoli perturbativi lineari nel campo dei nuclidi e, successivamente, l'implementazione delle procedure di calcolo per calcoli perturbativi nel campo non-lineare neutroni/nuclidi [rapporto RdS/PAR2013/017].

La procedura di calcolo lineare con il modulo MECCYCO risultava limitata a studi di evoluzione dei nuclidi a singolo step. Si è quindi deciso di costruirne un'altra, denominata GMECCYCO (GENERALIZED MECCYCO), che consenta analisi dell'evoluzione, sempre lineari, multistep. Questa procedura verrà poi integrata con altre nuove per consentire l'analisi di funzionali definiti nel campo lineare neutroni/nuclidi. La procedura risultante implica la definizione di una variabile intensiva di controllo al fine assicurare che nel calcolo delle perturbazioni sia rispettato il vincolo della potenza nominale imposta.

La metodologia per il calcolo perturbativo di funzionali della densità neutronica e di quella dei nuclidi che evolvono durante l'evoluzione (burn-up) del nocciolo è stata sviluppata sulla base della teoria delle perturbazioni generalizzate su base euristica (HGPT). Essa verrà pertanto definita HGPT-BU e potrà essere applicata a studi relativi all'evoluzione temporale del campo non-lineare neutroni/nuclidi in sistemi critici, o sottocritici. I funzionali di interesse possono riguardare:

- isotopi del combustibile. In questo caso il metodo potrebbe essere utilizzato per l'analisi della vita del nocciolo durante il burn-up ed essere quindi ricercati valori ottimali di parametri di progetto oppure strategie ottimali di caricamento del combustibile;
- la fluenza ad un tempo e punto stabiliti. In questo caso il metodo potrebbe essere usato per analizzare il danneggiamento sui materiali con la vita del reattore;
- la radiotossicità delle scorie a lungo termine;
- Il controllo residuale (riserva di reattività) a fine ciclo. L'analisi di questa quantità può essere di particolare interesse in studi volti ad estendere il ciclo di vita del reattore.

I risultati raggiunti possono riassumersi nei seguenti punti:

- E' stata integrata in ERANOS una procedura per utilizzare il modulo MECCYCO per il calcolo perturbativo nel campo lineare dei nuclidi. Tale procedura, denominata GMECCYCO è necessaria per la successiva implementazione del metodo perturbativo nel campo non-lineare neutroni/nuclidi.
- Sono stati compiuti dei test di calcolo dimostrativi della metodologia GPT-BU con ERANOS per casi semplici di evoluzione senza e con trasmutazione. L'utilizzo della procedura GMECCYCO ha portato a dei risultati molto incoraggianti. La precisione dei calcoli rispetto ai valori di riferimento, ottenuti come differenza di calcoli diretti in condizioni perturbate ed imperturbate, si aggira attorno al 2,5%.

Relativamente alla progettazione del nocciolo del DEMO LFR, scopo del lavoro è stata l'individuazione e l'analisi di possibili soluzioni alle criticità dell'attuale progetto di nocciolo, così come evidenziate da una preliminare revisione critica del progetto stesso, per compilare una lista di opzioni e raccomandazioni che servano all'impostazione di una nuova fase di progettazione del nocciolo di tale reattore [rapporto RdS/PAR2013/018].

Le principali criticità riscontrate nell'attuale progetto di nocciolo di ALFRED, e su cui dunque si sono concentrate le indagini del presente studio, sono state:

- il sottoraffreddamento dei sottocanali angolari dell'elemento di combustibile, che porta la guaina delle barrette affacciate a tali sottocanali a superare la temperatura di 550 °C, fissata come vincolo di progetto in quanto limite di certa resistenza a corrosione per il materiale della ricopertura protettiva della guaina stessa;
- il superamento del limite di 2 DpA nelle sezioni dell'Inner Vessel affacciate alla regione attiva, che comporta, per tale componente, l'esposizione al danneggiamento da radiazione;
- la mancanza di margini di correzione di possibili errori di valutazione della massa critica, a causa della propagazione delle inevitabili incertezze intrinseche nella valutazione delle sezioni d'urto per i materiali di cui è composto il nocciolo;

- la mancata stima dell'impatto, sulla criticità del sistema, delle impurezze presenti nel refrigerante;
- l'assunzione di un materiale, successivamente rivelatosi inadatto, per la realizzazione della scatola esagonale degli elementi, dunque la mancata valutazione dell'impatto sulla criticità dell'impiego di un altro materiale.

Riguardo al sovrariscaldamento delle barrette affacciate ai sottocanali angolari, sono state analizzate tre possibili soluzioni:

- rimuovere le barrette angolari, per evitare che sia depositata potenza nei canali ad esse adiacenti, e dunque evitare alla radice che i canali angolari possano scaldarsi;
- traslare opportunamente le barrette angolari radialmente verso l'interno, allargando i sottocanali angolari a scapito di quelli ad essi opposti;
- allargare la chiave della scatola esagonale, allargando così tutti i canali periferici, ivi inclusi quelli angolari.

A seguito di considerazioni di natura idraulica, meccanica e neutronica, l'unica soluzione apparentemente perseguibile è quella dell'allargamento della chiave della scatola esagonale (Figura 285), essendo le implicazioni di questa le più facilmente ovviabili. Tale soluzione è pertanto quella che viene raccomandata come riferimento per la concezione della nuova configurazione di nocciolo di ALFRED.

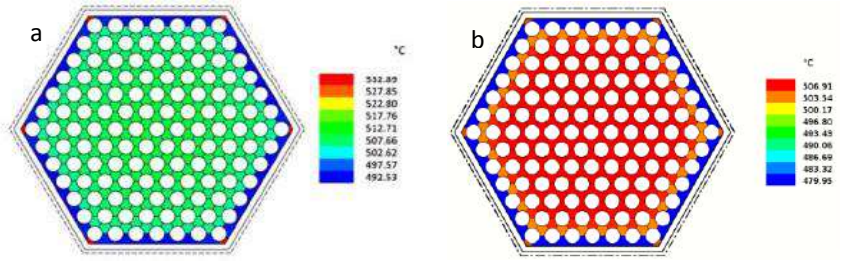


Figura 285. Distribuzione delle temperature di sottocanale all'estremità superiore della colonna attiva per l'elemento centrale nel caso di riferimento (a) e nella nuova configurazione (b)

Riguardo al sovradanneggiamento dell'Inner Vessel, ed in considerazione della necessità di allocare spazio per gestire potenziali margini di correzione della massa critica, si è ritenuto inevitabile incrementare lo schermaggio, allargando il diametro dell'Inner Vessel stesso, così da accomodare un numero maggiore di corone di elementi "dummy" a sua protezione. In caso sia necessario cercare un compromesso tra l'aumento dello schermaggio e la minimizzazione del volume del sistema, è stato anche considerato uno schermo polifunzionale (la cui efficacia è stata anche valutata), con elementi diversi nelle diverse corone che circondano la regione moltiplicante, e più precisamente: una regione riflettente, adiacente al nocciolo, per non penalizzare l'economia neutronica, ed una assorbente, immediatamente prima dell'Inner Vessel, per minimizzare il flusso neutronico.

Sono infine stati valutati gli impatti sulla criticità di diversi livelli di impurezze presenti in lotti commerciali di piombo (nello specifico, i cosiddetti standard russi di purezza *C*00, *C*0, *C*1 e *C*2C), e la sostituzione del materiale di cui sono costituite le scatole esagonali degli elementi (acciaio austenitico 15-15Ti al posto del ferritico-martensitico T91). Tutte le soluzioni analizzate sembrano, in questa fase, ben soddisfare i requisiti inizialmente posti, e presentando implicazioni tutte apparentemente ovviabili, dunque senza che alcun punto critico emerga dal presente studio. Per tale ragione, tali soluzioni sono suggerite ai progettisti di nocciolo di ALFRED per la imminente, pianificata revisione dello stesso.

Relativamente agli studi preliminari di tecniche di monitoraggio del nocciolo di ALFRED, il lavoro è stato articolato su due filoni, tecnicamente indipendenti pur afferendo, concettualmente, alla medesima famiglia delle tecniche di monitoraggio di nocciolo.

Il primo studio è stato volto alla valutazione della possibilità di inserire rivelatori neutronici all'interno del vessel di ALFRED, in prossimità del nocciolo, col duplice scopo di monitorare il livello integrale di flusso neutronico quando il reattore opera in regime di potenza, dando così un segnale ridondante a quello del sistema tradizionale di rivelatori posti ex-vessel, tipicamente impiegato nei reattori veloci; mappare la distribuzione spaziale del flusso neutronico, per rivelare prontamente possibili distorsioni di questo, dunque comandare – ove necessario – l'intervento del sistema di protezione del reattore prima che siano superati i limiti di sicurezza del nocciolo.

Il secondo studio è stato invece rivolto all'adattamento e all'applicazione di una tecnica di individuazione dell'elemento cui appartiene una barretta su cui si sia verificata una rottura della guaina, con conseguente rilascio nel circuito primario del suo inventario di radioattività. La tecnica si basa sul pre-caricamento di tutte le barrette

afferenti allo stesso elemento di combustibile con un “cocktail” di gas marcatori che, una volta attivati in core, e a seguito di rilascio nel primario, liberazione nel cielo di pila e rivelazione dai detector γ, fornisca un segnale indistinguibile, univoco dell’elemento in questione.

Per quanto concerne il monitoraggio della distribuzione spaziale del flusso neutronico, il lavoro si è svolto in tre fasi principali. In primo luogo è stata condotta un’indagine sulla strumentazione commercialmente disponibile, per identificare un set verosimile di caratteristiche per i detector che s’intende utilizzare in-vessel.

Successivamente, sono stati definiti i criteri guida per la definizione delle mansioni del sistema di monitoraggio sotto indagine, la cui applicazione ha quindi consentito di individuare nel sistema le posizioni in cui saranno alloggiati i rivelatori. Sulla base di queste informazioni, è stato quindi opportunamente modificato il modello MCNP di simulazione del reattore, includendo opportune regioni quanto più possibile rappresentative dell’alloggiamento dei detector e dei detector stessi.

In ultima analisi, la simulazione Monte Carlo della distribuzione spaziale di flusso nel sistema – detector inclusi – ha permesso di ricavare le funzioni di risposta attese dalle diverse sonde del sistema di monitoraggio sotto esame. L’analisi di questi risultati ha fatto emergere un generale buon accordo fra la distribuzione spaziale delle risposte dei rivelatori e quella delle potenze degli elementi di combustibile nel nocciolo, sia in condizioni nominali, sia nel caso anormale di estrazione spuria di una barra di controllo. In quest’ultimo caso, in particolare, è emersa la sostanziale proporzionalità fra l’aumento della potenza degli elementi adiacenti alla barra di controllo estratta e l’aumento del relativo segnale dei detector presenti in questi elementi, mostrando la potenzialità del sistema di monitoraggio qui proposto di individuare tempestivamente distorsioni della distribuzione di potenza rispetto al normale funzionamento del reattore, e quindi di comandare l’attuazione di opportune contromisure in carico al sistema di protezione del reattore.

Il secondo studio del presente lavoro si è a sua volta articolato in due fasi. In primo luogo, la base teorica della metodologia di discriminazione della sorgente di rilascio di prodotti di fissione nel circuito primario sulla base di marcatori univoci per ogni elemento di combustibile, originalmente sviluppata per applicazione al reattore PRISM di GE, è stata ripresa ed adattata allo spettro ed ai prodotti di fissione specifici di ALFRED, verificando che un numero sufficiente di miscele di gas marcatori fosse realizzabile senza immobilizzare una parte sensibile del volume del plenum delle barrette di combustibile, dunque senza pregiudicarne la capacità di accomodare i prodotti di fissione gassosi che si liberano durante l’irraggiamento in pila.

In una seconda fase, sono state analizzate le possibili opzioni di ottimizzazione concesse dalla metodologia in esame (tra le principali: la minimizzazione del volume occupato dai gas marcatori, la riduzione delle incertezze nella discriminazione delle diverse miscele, la flessibilità ad operare in diverse regioni di flusso neutronico, o la massimizzazione del potere risolutivo della traccia delle miscele), discutendone i possibili vantaggi e svantaggi così da guidare il progettista nella successiva scelta dei parametri di applicazione del metodo.

Il risultato dell’applicazione ad ALFRED della metodologia proposta ha indicato la possibilità di identificare un numero sufficiente di miscele facendo uso di tre dei quattro gas marcatori inizialmente individuati, ancora rispettando largamente il limite sul volume massimo di precarico delle barrette. In particolare, la possibilità di eliminare lo Xe-128 dal novero dei gas marcatori ha consentito una notevole semplificazione della procedura, in ragione del fatto che il figlio di quest’ultimo, lo Xe-129m, è generato anche come prodotto di fissione nel combustibile.

È infine utile notare che il caso specifico di applicazione della metodologia proposta ha richiesto la formulazione di ipotesi su alcuni dei parametri su cui la metodologia stessa si fonda. Cionondimeno, la validità generale del lavoro in esame è mantenuta anche nel caso in cui più approfondite analisi suggeriscano valori più appropriati per i suddetti parametri.

I risultati dell’attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/019.

a.3 Analisi di sicurezza

Relativamente alla definizione di strumentazione per la misura di flussi neutronici in reattori veloci LFR, il lavoro svolto ha avuto come obiettivo lo studio dell’applicazione della strumentazione neutronica disponibile in commercio ai reattori LFR, proponendo miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l’efficacia e l’adeguatezza del sistema di strumentazione, monitoraggio e controllo di reattore.

In particolare, si è scelto il prototipo dimostrativo ALFRED, simulandone con MCNPX il pressure vessel e tutte le strutture interne a un elevato livello di dettaglio (Figura 286), al fine di ricavare il termine sorgente per la strumentazione, ovvero il flusso neutronico in termini quantitativi e qualitativi per le posizioni di reattore che verosimilmente possono ospitare la strumentazione. Si è proceduto a valutare le prestazioni della strumentazione disponibile in commercio, illustrandone potenzialità e problematiche. In seguito, sono stati proposti sviluppi e miglioramenti alle tecnologie in uso, con l'obiettivo di delineare delle modifiche potenzialmente attuabili al fine di ottimizzare la strumentazione per ambienti tipo LFR. Si è concettualizzata la possibilità di sviluppare e costruire rivelatori ad hoc sia per il monitoraggio in-core che out-of-core, realizzandone un prototipo da testare in facility sperimentali in grado di fornire spettri neutronici veloci.

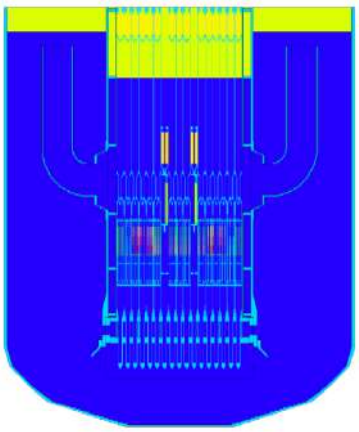


Figura 286. Vista in sezione del reattore LFR dimostrativo ALFRED, all'interno del codice MCNPX

Dai risultati ottenuti, ciò che si è delineato nello studio condotto può riassumersi nelle seguenti considerazioni. Le camere a fissione, come tecnologia di rivelazione, non riescono a coprire, con un singolo strumento le esigenze di monitoraggio di ALFRED. La sensitività della FC Photonis CFUE32 è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento alla potenza nominale, ma esiste un problema di durabilità a tali livelli di potenza, perché l'eccessiva sensitività "brucia" la camera troppo in fretta (3 mesi). Per contro la FC Photonis CFUE43 segue bene le potenze più elevate anche in termini temporali, perché la vita dello strumento sarebbe nell'ordine di qualche anno per le installazioni appena fuori dal nocciolo. Ne segue che la camera a fissione ottimizzata per l'applicazione nel reattore ALFRED deve avere una sensitività compresa fra le due precedentemente citate.

I Self Powered Neutron Detector presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede almeno valori nell'ordine dei MW. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono alimentazione elettrica per poter operare. Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo. Ne segue che, ottimizzando questa tecnica di monitoraggio, si pensa di ottenere uno strumento molto adatto al controllo del reattore ALFRED nei regimi prossimi alla potenza nominale.

L'analisi condotta attraverso la simulazione Monte Carlo ha mostrato la necessità di portare avanti ulteriori studi circa la strumentazione da applicare al reattore, perché quella commercialmente disponibile al momento risulta applicabile, ma non completamente adeguata, lasciando ipotizzare così consistenti margini di miglioramento.

In particolare le camere a fissione si dimostrano essere più adeguate a monitorare la potenza 0 e la salita in potenza, data la loro elevata sensitività al flusso neutronico; il monitoraggio di elevate potenze (ordine delle decine di MW) consumerebbe troppo in fretta lo strumento mettendolo ben presto fuori uso; a seconda del posizionamento prescelto e del range di potenza che si intende investigare, sono possibili ottimizzazioni attraverso modifiche funzionali, di layout e di materiali. I SPND-pronti si dimostrano, tecnologicamente, strumenti semplici, efficaci, resistenti e sicuri per il monitoraggio della potenza nominale; sono da investigare, tuttavia, ottimizzazioni di tali strumenti per le condizioni di reattore LFR, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore nel range delle alte potenze; sono, inoltre, da investigare ulteriormente i limiti di bruciamento ammissibili per tali strumenti. I rivelatori al diamante non sono mai stati applicati alla reattoristica convenzionale, essendo stati concepiti più per esigenze di ricerca per neutronica delle alte energie. La caratteristica che li rende interessanti è la loro resistenza in ambienti sostanzialmente ostili in senso radiologico. Ulteriori studi sono necessari al fine di determinare quanto e come tali strumenti siano adattabili anche alle caratteristiche del flusso neutronico di reattore LFR. Infine la strumentazione di monitoraggio della salita in potenza va estratta e riposta nell'approccio alla potenza nominale; ne segue che, a seconda del posizionamento, va concepito un sistema di movimentazione rapido, efficace e sicuro. Rimane da approfondire la prontezza del monitoraggio esterno del reattore ai fini di comando e controllo: le dinamiche evolutive dei reattori veloci, essendo più rapide dei tradizionali reattori ad acqua, richiedono che la catena di controreazione abbia costanti di tempo inferiori, pertanto l'allontanamento fisico della sonda dal fenomeno in monitoraggio costituisce un ritardo da tenere in considerazione in fase di progettazione del sistema di controllo.

Al fine di colmare la mancanza di dati sperimentali sulle sonde, si è concettualizzata un'iniziale campagna di misura in TAPIRO utilizzando strumenti commercialmente disponibili, così da confrontare le prestazioni ottenute dalla simulazione con quelle realmente sperimentate. Tale studio è funzionale alla verifica dell'applicabilità della strumentazione attuale ai reattori veloci di tipo LFR, nonché di enorme ausilio allo sviluppo di disegni innovativi ai fini della realizzazione di nuovi prototipi.

I risultati dello studio di fattibilità relativo alle sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR e dei test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/020.

Relativamente agli studi per il supporto alla progettazione dei reattori nucleari veloci e alla loro analisi di sicurezza, si è sviluppata la progettazione di una possibile piattaforma di simulazione ingegneristica per reattori refrigerati al piombo, con esplicito riferimento al reattore ALFRED [rapporto RdS/PAR2013/021].

Tale piattaforma è stata inizialmente abbozzata nella precedente annualità, sia raccogliendo informazioni impiantistiche sulla filiera dei reattori refrigerati a piombo liquido, che identificando un primo set di codici potenzialmente utili allo scopo. Tale lavoro terminava con la proposizione di una prima possibile architettura della piattaforma. La piattaforma viene proposta come strumento flessibile, multi-purpose ed altamente innovativo. La flessibilità d'uso deriverà dalla selezione di codici sofisticati e codici semplificati (utilizzabili quindi in applicazioni più o meno complesse) per analizzare le singole sezioni di simulazione (es. neutronica, termoidraulica, contenimento, eventi estremi naturali, processi di dispersione atmosferica di radionuclidi in caso di incidente, etc.).

L'obiettivo della molteplicità di uso deriva dall'entità dello sforzo modellistico proposto. In tal senso lo strumento potrà avere diverse funzioni: progettazione (iniziale, intermedia, di rifinitura), di verifica di sicurezza, di pre-training, di education ad alto livello, e di comunicazione al pubblico o agli esperti del settore.

Nel corso dell'attività si è principalmente badato a:

- focalizzare le informazioni impiantistiche sul reattore ALFRED ed in particolare sui sistemi e sotto-sistemi che non erano stati trattati con dettaglio l'anno precedente per il PAR 2012;
- aumentare considerevolmente le informazioni sui codici utilizzabili per la realizzazione della piattaforma, andando a cercare i modelli più adatti ia entro ENEA che in campo nazionale ed internazionale;
- incrementare ed armonizzare le informazioni sui singoli codici: questo è stato ottenuto primariamente con la creazione di un "template" comune a tutti i codici di calcolo considerati che dunque rappresenta ora il "minimo comune multiplo" informativo su detti strumenti. Tale informazioni saranno la base per la realizzazione di un diagramma di flusso dei 'meta-dati' della piattaforma di simulazione;
- dettagliare la architettura possibile per integrare in modo razionale ed efficace tali software in una unica 'piattaforma', iniziando anche a discutere le diverse problematiche di integrazione e di gestione intelligente dei vari modelli software.

Sono le "Lessons Learned" dall'incidente di Fukushima che suggeriscono in modo più o meno esplicito le direzioni di evoluzione dei futuri simulatori ingegneristici. E tale innovazione deve dare spazio adeguato alla rappresentazione credibile e significativa dei possibili eventi naturali estremi (tsunami, uragani, tornado, eventi termici estremi, inondazioni, incendi…) come recentemente (luglio 2014) discusso in Vienna in occasione di un ampio Technical Meeting IAEA sul tema .

Il lavoro evidenzia come i simulatori ingegneristici del futuro (da usare primariamente per lo sviluppo del progetto ed alcune verifiche di sicurezza) non rappresenteranno più i reattori come entità isolate dal 'resto del mondo' , che viene visto mediante semplici condizioni al contorno. Il dominio di analisi tenderà inesorabilmente ad allargarsi, e la centrale tutta (comprensiva di più unità per analizzare anche i danni da causa comune e le interazioni tra le unità potenzialmente danneggiabili) sarà vista (anche attraverso l'utilizzo di sistemi GIS e di tecniche di rappresentazione virtuale) integrata con l'ambiente ed il territorio circostante. Tale ampliamento di visione includerà sia gli eventi che il mondo esterno può generare mettendo a rischio la integrità degli edifici e delle infrastrutture degli impianti, sia i processi di rilascio di sostanze radioattive che dovessero verificarsi a seguito di incidenti più o meno gravi. Tali processi andranno simulati con le migliori tecniche disponibili per avere stime di concentrazioni in aria ed al suolo credibili nelle varie scale geografiche da considerare (locale, regionale, nazionale e-o continentale). Anche nel settore della modellistica di impatto sul mondo esterno il presente rapporto include un significativo ampiamento di informazioni rispetto al PAR2012 e la individuazione di tre strumenti software che potrebbero rappresentare una soluzione 'finale' per questa parte della codicistica della Piattaforma di Simulazione Ingegneristica per il reattore ALFRED ('PSIA').

In Figura 287 sono riportate l'architettura generale aggiornata della piattaforma ingegneristica in progettazione ed il dettaglio della sezione di simulazione dedicata agli eventi naturali.

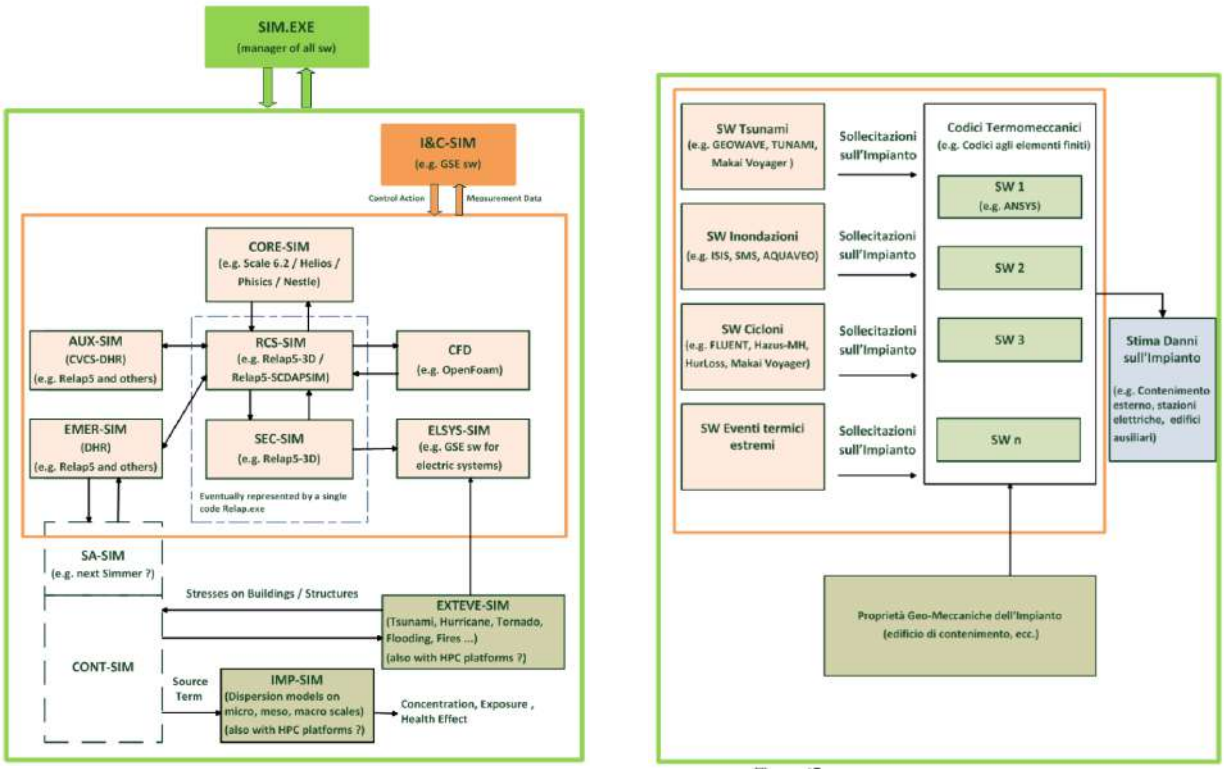


Figura 287. Architettura generale della piattaforma ingegneristica e contenuti software della sezione EXTEVE-SIM

Nell'ambito delle attività concernenti la modellazione e analisi del comportamento integrale di barretta di combustibile per il progetto di reattori a piombo innovativi, l'attività svolta nel PAR 2013 affronta una prima fase dell'attività relativa al miglioramento di codici di calcolo per la simulazione integrale della barretta di combustibile (analisi termomeccanica) in un intervallo di condizioni operative che vanno dal normale esercizio alle situazioni incidentali più gravose (escluse quelle di estesa fusione, previste in caso di incidenti severi). Nel PAR 2012, attività di validazione con il codice TRANSURANUS, erano state effettuate grazie a dati sperimentali disponibili. Queste avevano riguardato la predizione della temperatura di fusione al centro del combustibile e analisi dei gas di fissione in combustibili MOX ad elevato burn-up.

Il lavoro svolto nel PAR2013 riguarda una revisione critica dei principali modelli di conduzione per combustibili MOX con aggiunta di percentuali di attinidi minori, per poi passare ad una fase di sviluppo e implementazione nel codice TRANSURANUS di tali modelli. Questa attività ha i seguenti obiettivi: da un lato un'estensione delle capacità del codice di modellare combustibili per reattori veloci di IV generazione, con principale riferimento al reattore LFR; dall'altro un avanzamento nella modellazione del rilascio dei gas di fissione, vista la rilevanza che la conducibilità del combustibile ha sulla sua temperatura.

L'attività, dopo aver identificato tutti principali parametri e processi che influenzano la conducibilità, ha riguardato la valutazione delle correlazioni disponibili del codice TRANSURANUS, riportando le correlazioni, le dipendenze ed i range di validità. Successivamente si è fatta una rassegna dei modelli disponibili in letteratura, rilevanti allo scopo dell'attività e derivabili dalle attività sperimentali effettuate nell'ambito del progetto FP7 PELGRIMM. Questi modelli sono stati poi confrontati al fine di selezionare il modello candidato per l'implementazione. L'attività è svolta in sinergia con i progetti EC FP7 PELGRIMM e EERA materiali nucleari SP5 e 6.

Relativamente alle azioni di sviluppo ed estensione del codice di fuel pin performance TRANSURANUS LFR-oriented per l'analisi di reattori innovativi raffreddati a piombo, il codice permette ora la modellazione e l'analisi termo-meccanica delle barrette di combustibile adottate nel reattore a piombo scelto come riferimento (ALFRED), al fine di ottimizzarne il design e le caratteristiche di sicurezza (Figura 288).

L'attività svolta ha riguardato una revisione critica dei principali modelli fenomenologici per il piombo e per gli acciai austenitici della classe 15-15Ti, materiale di guaina che si prevede di adottare in ALFRED. In particolare, sulla base dei dati sperimentali disponibili in letteratura, tale lavoro ha permesso di conseguire i seguenti risultati principali:

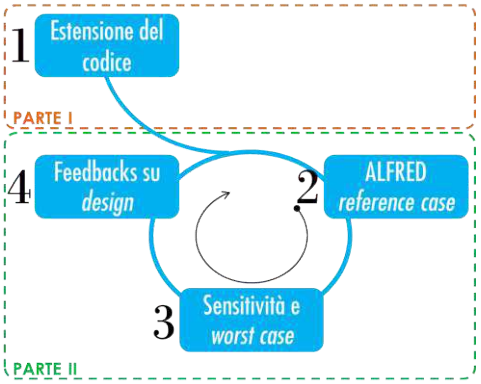


Figura 288. Processo di ottimizzazione condotto attraverso la versione estesa di TRANSURANS impiegabile per il progetto del reattore di riferimento ALFRED

- condurre una revisione critica delle correlazioni disponibili per i suddetti materiali nella versione originaria di TRANSURANUS (versione v1m3j12);
- mettere a punto correlazioni specifiche per la modellazione sia dell'acciaio di guaina AIM1, sia di un generico acciaio della classe 15-15Ti, focalizzando l'attenzione sulle problematiche relative allo swelling, allo scorrimento viscoso e ai tempi di rottura per interazione meccanica guaina-combustibile (aspetto cruciale, che era assente nella versione v1m3j12);
- realizzare la versione estesa di TRANSURANUS (LFR-oriented), che risulta adatta per le analisi termo-meccaniche delle barrette di combustibile impiegate nei reattori a piombo e che potrà offrire indicazioni utili al progetto del reattore di riferimento ALFRED e, più in generale, per migliorare la sicurezza intrinseca dei reattori innovativi raffreddati a piombo.

I risultati dell'attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/022.

Relativamente all'analisi numerica di scenari operativi e incidentali, l'attività tecnica consiste nella messa a punto, nell'applicazione e nella validazione di un approccio e di modelli per analisi di sicurezza di reattori veloci di IV generazione. L'attività, di lungo respiro, è multi-physics e multi-scale e trarrà beneficio dalla disponibilità di dati sperimentali misurati in reattore durante l'esecuzione di test sperimentali: protected (SHRT-17) ed unprotected (SHRT-45r) loss of flow nel reattore americano di ricerca Experimental Breeder Reactor II (EBR-II). L'attività nel suo complesso richiede uno sforzo sinergico di differenti competenze tecniche, dalla fisica del reattore, alla termoidraulica di sistema, alla fluidodinamica computazionale, alla termomeccanica del fuel.

Nell'ambito del PAR-2013 è stata completata la nodalizzazione dell'impianto iniziata nel PAR-2012. Questa consiste in un modello termoidraulico tridimensionale con codice di sistema RELAP5-3D© del reattore di ricerca EBR-II refrigerato a sodio. Sulla base dei dati disponibili e delle condizioni iniziali, fornite nelle specifiche del Benchmark sull'EBR-II, sono state verificate le condizioni di stazionario ed è stata realizzata la simulazione blind del transitorio SHRT-17, confrontando i risultati con i dati sperimentali. I risultati blind sono stati presentati al secondo meeting del IAEA CRP sull'EBR-II. A fronte dei dati sperimentali è stata poi effettuata l'analisi post-test.

Visto il livello di dettaglio della strumentazione negli assembly sperimentali XX09 e XX10, installati nel driver del reattore, è stato realizzato un modello CFD attraverso il codice ANSYS CFX per fornire informazioni dettagliate sulla distribuzione di temperature nell'assembly, partendo dalle condizioni al contorno fornite dalla termoidraulica e dalla neutronica. Il modello include in principio la conduzione nelle guaine e nel filo, la convezione nel refrigerante, la conduzione nella scatola esagonale ed il bypass flow. Partendo da quanto svolto nell'ambito del PAR2012, si è proseguita l'attività, i I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/2014/023.

Nell'ambito dell'analisi di sicurezza dei sistemi LFR è stato studiato il fenomeno della "core compaction" che rappresenta uno degli eventi base di progetto. Tale fenomeno è ad oggi poco noto, in base a quanto evidenziato dall'analisi dello stato dell'arte e messo in luce nell'attività svolta nell'ambito del PAR 2012.

Lo scopo dell'attività è stato analizzare in dettaglio il reattore e le componenti più importanti della regione del core. A causa dell'elevato onere computazionale legato al dettaglio con il quale sono stati realizzati i modelli FEM dell'inner vessel, diagrid e della lower e upper plate per poter eseguire le analisi di steady state e di transitorio dinamico si è reso necessario l'uso dell'approccio delle sottostrutture.

La messa a punto della modellistica si è basata sui risultati delle analisi di sensibilità eseguiti nel corso dell'attività del PAR 2012. L'esecuzione delle analisi dinamiche ha previsto pertanto:

- Upgrading dei modelli numerici sviluppati in maniera preliminare nel corso del PAR2012 con un dettaglio tale da poter rappresentare con maggior accuratezza i fenomeni idrodinamici e di FSI che influenzano la propagazione dei carichi dinamici. Nello studio eseguito è stato utilizzato un input sismico coerentemente con quello usato nel PAR2012. I modelli FEM sono stati realizzati mediante l'utilizzo del codice MSC®Marc: tali modelli sono rappresentativi del reattore, dell'inner vessel (Figura 289), delle piastre e griglie inferiori e

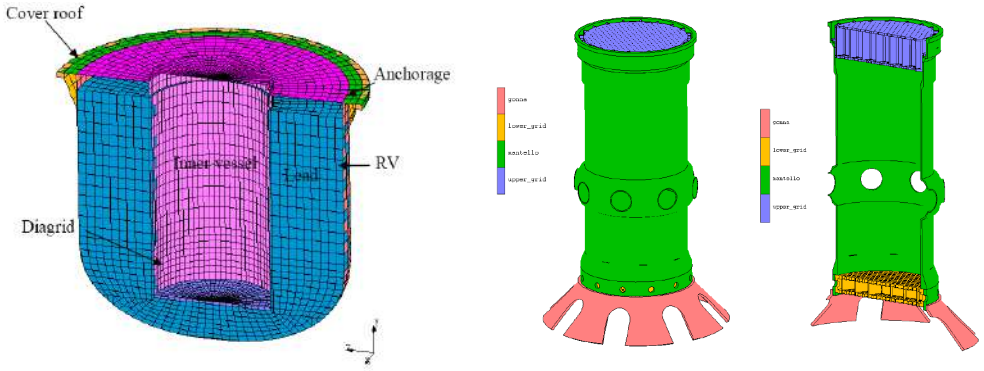


Figura 289. Modello FEM del reattore e dell'inner vessel

superiori, e dalla gonna di appoggio o diagrid.

- L'analisi dinamico-strutturali di modelli geometricamente complessi ha previsto l'esecuzione di analisi non lineari di transitorio dinamico del sistema vessel e in particolare l'analisi modale, l'analisi di steady state e di transitorio dinamico dell'inner vessel e della core region.
- Sono stati presi in considerazione anche le condizioni di contatto che si ritengono possano influenzare il comportamento dinamico mediante fenomeni di vibrazione e fenomeni hertziani.
- Determinazione delle condizioni al contorno, delle condizioni iniziali e della tipologia di interconnessione delle strutture (vincoli di contatto che influenzano notevolmente la propagazione delle sollecitazioni dinamiche e la deformazione delle componenti allo studio).

I risultati, in termini di spostamenti, sollecitazioni, accelerazioni), indotte sulle componenti dalla propagazione delle sollecitazioni sismiche hanno evidenziato una deformazioni localizzata nell'inner vessel e in corrispondenza delle lower and upper plate. L'entità del vettore spostamento è risultata dell'ordine di qualche centimetro. Inoltre l'analisi della distribuzione delle tensioni ha evidenziato alcune criticità nel design dell'inner vessel in particolar modo in corrispondenza delle tubazioni primarie le quali inevitabilmente influenzano anche la deformazione della core region.

E' stata anche effettuata un'analisi dinamica preliminare prendendo in considerazione le tipologie di contatto esistenti fra le piastre e l'inner vessel e fra questi ed il mantello del vessel. L'analisi preliminare dei risultati ha messo in evidenza, in accordo con quanto riscontrato in letteratura, che le forze di contatto (con sviluppo di contatto adattativo, interferenza o frizione) possono influenzare notevolmente il comportamento della struttura e l'evoluzione dello scenario compattazione. L'analisi ha messo in luce anche quelle che sono le problematiche aperte, interazione fluido-struttura, analisi dei sub-assembly, influenza delle forze e tipologie di contatto esistenti, influenza delle vibrazioni, etc. che devono essere analizzate per avere un quadro esaustivo del fenomeno della core compaction.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2013/024.

Infine, relativamente alle analisi di flow blockage, rifacendosi alla precedente annualità del PAR, è stata portata avanti un'analisi numerica attraverso la fluidodinamica computazionale (CFD) sugli elementi di combustibile (FA) refrigerati a metallo liquido in ambito tecnologia LFR. Per lo studio è stato preso in esame l'elemento esagonale chiuso del progetto di dimostratore LFR ALFRED. Il modello CFD presenta un elevato livello di dettaglio ed include le diverse regioni del FA: 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 consente di studiare situazioni di bloccaggio 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 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. Per casi di bloccaggio al piede i risultati ottenuti dalla CFD e da codici di sistema sono analoghi.

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 analisi condotte trascurano alcuni effetti: la deformazione delle pin a seguito dell'escursione termica, la conduzione radiale verso i elementi di combustibile adiacenti, e la retroazione neutronica.

Nella presente annualità è stata elaborata una procedura per la valutazione della retroazione neutronica a seguito della variazione di temperatura dei sottocanali. Preliminarmente è stata condotta una ricerca bibliografica sulle principali metodologie di valutazione della retroazione neutronica in caso di bloccaggio di un FA. A seguito di tale studio, si è pervenuta ad una procedura ingegneristica del primo ordine per dare una prima valutazione dell'effetto.

La procedura prevede l'utilizzo del codice deterministico di neutronica ERANOS 2.1 per la valutazione dei coefficienti di feedback negli elementi di combustibile. Questi coefficienti sono poi usati per quantificare l'inserzione di reattività nel nocciolo a seguito dell'escursione termica. I coefficienti calcolati sono associati: all'effetto Doppler, alla densità del combustibile, alla densità della camicia, alla densità del refrigerante.

L'inserzione di reattività è quindi calcolata in modo conservativo e cumulativo, in base alle massime escursioni di temperatura rilevate attraverso l'analisi CFD. La cinetica punto a 6 gruppi è stata implementata all'interno del codice ANSYS CFX utilizzando i solutori del codice per risolvere il sistema nel dominio del tempo. La reattività è stata introdotta seguendo la curva di salita di temperatura fornita dalle simulazioni CFD. Ciò ha permesso di avere una valutazione ingegneristica conservativa della variazione di potenza a fine transitorio in caso di bloccaggio locale. Seppure la metodologia proposta è del tutto "one-way", essa permette in linea di principio un accoppiamento stretto tra ERANOS e CFX attraverso la cinetica punto implementata all'interno del codice CFD.

I risultati indicano che il contributo più importante all'inserzione di reattività è quello relativo alla variazione di densità del combustibile. Gli altri contributi sono di piccola entità e rientrano nei margini di incertezza del codice. Se conservativamente si assume una variazione dell'1% di densità del combustibile, si valuta una reattività negativa introdotta intorno ai -20 pcm. L'integrazione della cinetica punto, porta, in 10 s di transitorio per un bloccaggio del 15%, ad una variazione dell'ordine del 10% sulla potenza. Tale risultato è del tutto tranquillizzante e ci porta a concludere che l'effetto della retroazione neutronica in caso di bloccaggio interno del FA è del secondo ordine e può essere trascurato in prima approssimazione.

Il lavoro sulla termo-idraulica di elementi di combustibile refrigerati a metallo liquido viene portato avanti in sinergia sia con attività sperimentali su bundle elettrici (ICE sull'impianto CIRCE ed FPS-19270 sull'impianto NACIE-UP) che attraverso studi di validazione attraverso dati sperimentali presenti in letteratura (impianto EBR II e test section di ORNL). Tale azione sinergica permette di individuare i seguenti sviluppi per la presente attività:

- un più stretto coupling tra ERANOS e CFX con l'uso di TRANSURANUS per le valutazioni nel combustibile;
- il ruolo della conduzione radiale agli elementi di combustibile adiacenti, da realizzare attraverso un modello CFD comprendente 7 elementi accostati;
- una analisi CFD preliminare per la definizione di una sezione di prova da installare su NACIE-UP o HELENA per studiare il flow blockage di un FA di 19 pin elettriche; tale studio è in sinergia con proposte parallele in ambito europeo, dove ENEA sarà coinvolto;
- la scalabilità del precedente esperimento al bloccaggio nel FA di ALFRED a 127 pin, da realizzare attraverso analisi CFD.

I risultati di questa attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/025.

a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione

Proseguendo le attività iniziate nei precedenti PAR, è proseguita la ricerca ed applicazione di metodi teorici e computazionali per la stima di grandezze termodinamiche non note ma necessarie per effettuare una prima valutazione della composizione del sistema combustibile-refrigerante all'equilibrio termodinamico mediante un codice basato sulla minimizzazione dell'energia libera di Gibbs. A tale scopo sono stati utilizzati due diversi approcci: quello basato sui metodi semi-empirici è risultato di più diretta applicazione, mentre quello basato sul

metodo DFT (Density Functional Theory) ha consentito di ottenere risultati, finora, solo in fase gas. I risultati prodotti sono descritti nei dettagli nel report RdS/PAR2013/026.

Per quanto riguarda l'applicazione di metodi semi-empirici, mediante l'implementazione in un programma MATLAB del metodo Miedema e della sua estensione al gruppo 16 (contenente l'ossigeno, estensione di Neuhasen) sono state stimate in modo sistematico le entalpie di formazione e soluzione in fase solida per una serie di composti di interesse per il problema in oggetto, quali intermetallici e ossidi binari ottenuti dalla combinazione del Pb con i seguenti elementi:

- U, Pu e O presenti nel fuel;
- Ag, Ba, Cd, Cs, Sr, Y, lantanidi, Pd, Rb, Ru, Sb, Sn, Zr, prodotti di fissione che si formano nel combustibile in seguito all'irraggiamento;
- Fe, Cr, Mo, Mn, Si, Ni, Co, N, C, S, P, W, Nb, V, Ti, B, Cu, Al, presenti in diversa misura nella guaina.

Per poter trattare i composti ternari, dopo un'opportuna selezione e validazione, è stata individuata l'estensione di Gallego al modello Miedema. Tale formulazione, combinata con l'estensione di Neuhasen per gli ossidi, è stata inserita nel programma in MATLAB e si è proceduto con il calcolo dell'entalpia di formazione dei seguenti sistemi:

- Pb-U-Pu;
- Pb-Cs-Sr, Pb-Cs-Y, Pb-Cs-Tc, Pb-Sr-Y, Pb-Sr-Tc, Pb-Y-Tc, Pb-Cs-U, Pb-Cs-Pu, Pb-Sr-U, Pb-Sr-Pu, Pb-Y-U, Pb-Y-Pu;
- Pb-O-Cr/Mo/Ti;
- Pb-O-Cu/Mo/Ni/Ti.

È stato individuato ed applicato il metodo semi-empirico di Witusiewicz per la stima dell'entropia di miscelamento, a partire dall'entalpia di soluzione equimolare calcolata col metodo Miedema. Si è quindi proceduto alla stima dell'entropia degli intermetallici La-Pb, Fe-Pu, Sr-Pb e Cs-Pb.

Per quanto riguarda il calore specifico in fase solida, si è proposto un metodo molto semplice per stimare tale grandezza, partendo dalle informazioni sui singoli elementi e assumendo un andamento lineare. Questo approccio è stato validato su composti per i quali l'andamento del calore specifico in funzione della temperatura è noto, quindi applicato in modo sistematico ai composti intermetallici U-Pb, Pu-Pb, Fe-Pb, La-Pb, Fe-Pu, Sr-Pb e Cs-Pb. Per i medesimi composti è stato stimato anche il calore specifico in fase liquida, basandosi sulla legge di Kopp, dove però è stato utilizzato non il calore specifico alla T_{fus} del composto, ma i calori specifici degli elementi costituenti alla loro T_{fus}. Parallelamente si sta studiando anche la valutazione del calore specifico con la formulazione empirica proposta da Witusiewicz ottenuta derivando l'espressione dell'entropia di miscelamento da lui proposta.

Seguendo l'approccio DFT individuato nei precedenti progetti, sono state effettuate in maniera sistematica, con il simulatore Gaussian, tramite il funzionale B3PW91 e diversi pseudopotenziali e basis set a seconda dell'elemento in analisi, simulazioni (a 298,15 K e 1 bar) sui seguenti composti in fase gas:

- Ossidi di Pb: PbO, PbO_2, Pb_3O_4;
- Intermetallici Pu-Pb: PuPb, $PuPb_3$, Pu_3Pb;
- Ossidi dell'Americio: AmO, AmO_2, AmO_3, Am_2O_3;
- Intermetallici Am-Pb: AmPb, $AmPb_3$, Am_3Pb;
- Intermetallici con elementi della guaina: $PbFe_2$, $PbAl_2$, $PbAl_3$, $PbNi_2$, $PbNi_3$, $PbNi_4$, PbCr, PbCrO4;
- Intermetallici Pb-FP: $LaPb_3$, $SrPb_3$, Cs_2Pb_3;
- Intermetallici: UFe_2, UNi_2, $PuFe_2$, $PuNi_2$;
- Ossidi del Np (in fase di studio);
- Composti ternari: uranato di Cs e di Pb (in fase di studio).

Per ciascun composto è stata effettuata l'ottimizzazione geometrica per individuare la configurazione di minima energia. Quindi, a partire dalle frequenze vibrazionali e dal momento d'inerzia ottenuti in output dal codice, sono state calcolate l'entropia S e il calore specifico c_P in fase gas. Dalle energie SCF, ZPE e H_{corr} in output da Gaussian, sono state ricavate l'energia di dissociazione D0 e l'entalpia di formazione ΔH_f in fase gas. I risultati ottenuti sono stati utilizzati per compilare un database di dati termodinamici in fase gas. Tale database verrà utilizzato per valutare la composizione all'equilibrio di un sistema contenente tutti i composti qui considerati limitatamente alla fase gas.

Inoltre, mediante il modulo SCRF del codice Gaussian si sta procedendo ad inserire nel calcolo la presenza del solvente, Pb liquido, al fine di valutare il ΔG di solvatazione da cui ricavare informazioni circa la solubilità del composto nel solvente (Pb liquido).

In generale, in rapporto allo sforzo computazionale richiesto si è osservato un accordo accettabile tra i dati stimati, sia con i metodi semi-empirici che col metodo DFT, e quelli di letteratura. Tuttavia è da sottolineare che la scarsità

di dati sperimentali e l'incertezza ad essi associata rende estremamente difficile la fase di validazione degli approcci proposti, nonché la valutazione dell'accuratezza dei metodi scelti.

I metodi semi-empirici individuati hanno permesso di stimare le grandezze termodinamiche citate per numerosi composti di interesse, che sono stati quindi inseriti nel database di dati termochimici e hanno permesso di continuare lo studio della composizione del sistema combustibile-refrigerante all'equilibrio termodinamico. In particolare, è stato approfondito lo studio del sistema PuO_2-Pb, al fine di meglio comprendere la reattività del sistema MOX-Pb osservata per T>1150 K. Infine è in fase di studio un sistema MOX_{irr}-Pb in cui il combustibile MOX irraggiato è simulato con l'aggiunta di La, Sr e Cs, quali esempi di prodotti di fissione. Finora è stata confermata la bontà della risposta del codice per quanto riguarda il sistema La-Pb confrontandola col diagramma di fase. Tale confronto tra la previsione del codice e i diagrammi di fase binari viene effettuato per ogni elemento introdotto nel sistema e funge da controllo indiretto sulla bontà delle informazioni termodinamiche. Quindi si è valutata la stabilità del sistema MOX-La-Pb, che mostra un comportamento analogo al sistema MOX-Pb, senza la formazione significativa di composti contenenti La. Le medesime valutazioni sono in corso per i sistemi Pb-Cs e Pb-Sr.

Presso i laboratori ENEA sono state condotte prove sperimentali, secondo quanto di seguito riportato.

a. *Interazioni, a caldo, tra prodotti di fissione (simulati) e piombo fuso*
   La caratteristica comune a tutte le esperienze effettuate riguarda l'assoluta assenza di interazione tra il piombo fuso e ciascuna delle sostanze prese in esame.
   L'aspetto probabilmente di maggior rilievo riguarda il fatto che in tutte le esperienze effettuate sono state utilizzate specie chimiche aventi una densità inferiore a quella del piombo fuso: 7,65 g/cm^3 per l'ossido di cerio; 3,988 g/cm^3 per il cloruro di cesio; 6,62 g/cm^3 per l'antimonio metallico; 3,12 g/cm^3 per lo ioduro di potassio; 5,10 g/cm^3 per l'ossido di stronzio; 7.40 g/cm^3 per l'ossido di europio, a fronte di una densità del piombo non inferiore a 9 g/cm^3 fino alla temperatura di 1550°C.
   Di conseguenza, non essendosi verificate interazioni di natura chimica con il piombo, è naturale che tutte le specie prese in esame "galleggiassero" sul fuso.
   Sulla base di tali considerazioni, qualora, come è probabile, non si avessero interazioni chimiche tra l'ossido di uranio (IV) e il piombo fuso, UO_2 (densità 10,97 g/cm^3 a temperatura ambiente) dovrebbe andare a fondo o, quantomeno, non galleggiare sulla superficie del piombo.

b. *Prove su impianto OGATA (Off-Gas Treatment Apparatus) per la "cattura" di prodotti di fissione volatili*
   Le prove sono state condotte su cloruro di cesio e ioduro di potassio, sotto un flusso di argon, per una durata di 45 minuti.
   Sulla base delle evidenze derivanti dagli esperimenti eseguiti con cloruro di cesio, si possono trarre, cautelativamente, le seguenti conclusioni:

   - alla temperatura di 900 °C il cloruro di cesio è particolarmente volatile. Buona parte dei vapori condensano all'interno del reattore, mentre un residuo viene verosimilmente trattenuto dalle soluzioni di acido nitrico;
   - quando il cloruro di cesio volatile gorgoglia attraverso piombo fuso, mantenuto a 900 °C, non interagisce con quest'ultimo, ma condensa parzialmente all'interno del reattore. L'aliquota che fuoriesce dallo stesso viene "catturata" nelle bottiglie di lavaggio;



Figura 290. Veduta d'assieme di uno degli assemblaggi dell'impianto OGATA

   - la quota parte di cesio cloruro che raggiunge la trappola di Zeolite 4A, mantenuta alla temperatura di 520 °C, interagisce, anche se solo in parte, con la zeolite, sulla quale si deposita verosimilmente per adsorbimento superficiale (assai improbabile lo scambio ionico). L'entità dell'interazione tra il cesio cloruro e la zeolite dipende, molto probabilmente, dal flusso di gas, dall'altezza della colonna di zeolite e dall'impaccamento della stessa: tutti parametri che andrebbero ottimizzati.

b. Materiali e Fabbricazioni

b.1 Qualifica, modellazione e analisi di coating e materiali strutturali per sistemi LFR

Nei precedenti PAR le attività di R&D sui materiali per il nucleare di IV generazione sono state focalizzate sui rivestimenti per la protezione dalla corrosione da metallo liquido pesante, con particolare enfasi, per i materiali

strutturali del nocciolo del reattore, come le camicie del combustibile, griglie di supporto etc.. Sono stati sviluppati rivestimenti passivanti basati su leghe Al-Fe depositati per Arc-PVD e ceramici a base TiN per sputtering. Sono stati inoltre sviluppati rivestimenti di allumina amorfa mediante la tecnica di deposizione per ablazione laser (PLD).

Successivamente, sono stati sviluppati rivestimenti multistrato costituiti da un deposito intermedio a base FeAl o FeCrAl e da un rivestimento esterno di Al_2O_3 mediante varie tecniche di deposizione.

Le attività del presente PAR, in continuità con i precedenti hanno riguardato lo sviluppo e ottimizzazione di un nuovo processo di deposizione chimica da fase vapore (CVD), e l'ottimizzazione dei rivestimenti prodotti nelle passate annualità con modifiche su composizione, architettura e tecnica di deposizione, sulla base dei risultati emersi dalla campagna sperimentale 2012/13.

Si è inoltre proceduto alla qualifica dei rivestimenti messi a punto nelle annualità precedenti attraverso caratterizzazioni meccaniche, prove di ciclaggio termico, prove di diffusione isoterma e prove di irraggiamento. Nel contesto delle attività sui materiali strutturale per sistemi LFR quest'anno è stata inoltre avviata una attività rivolta allo sviluppo di modelli basati sulle tecniche di dinamica molecolare per l'evoluzione del danno da corrosione per acciai esposti a metallo liquido pesante.

Ricoperture basate su leghe FeCrAl con la tecnica CVD

L'attività ha riguardato la messa a punto di un processo di alluminizzazione per CVD chiamato Pack Cementation su substrati di acciaio 15-15 Ti e P91. Si tratta di un processo di diffusion coating ad alta temperatura e lo scopo della ricerca e stato la messa a punto di un protocollo che fornisca la concentrazione superficiale di Al desiderata e che non modifichi la microstruttura dei substrati (densità di dislocazioni, dimensione dei precipitati etc.) per conservarne le caratteristiche meccaniche e di comportamento sotto irraggiamento. I substrati scelti sono i materiali candidati per la realizzazione dei componenti del nocciolo per i reattore Gen IV. In particolare sono state variate la natura dell'attivatore, la sua percentuale, la temperatura e durata del trattamento di alluminizzazione. Sono stati prodotti campioni con composizione superficiale ricca in Al (intorno al 10-12%wt) ed uno spessore della regione alluminizzata intorno ai 60-70 µm. Si è osservata una leggera diminuzione della durezza nel substrato legata al parziale annealing dei difetti durante il processo. I rivestimenti sono stati sottoposti a trattamenti termici ciclici (25 cicli in aria con T_{min} 380 e T_{max} 630) che a parte un leggero aumento della durezza nel substrato in prossimità dello strato alluminizzato, legato a fenomeni di diffusione e conseguente solution hardening, non hanno modificato l'integrità e la microstruttura del rivestimento. I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2013/027.

Prove di ossidazione isoterma

Per studiare il deterioramento della funzionalità dei rivestimenti per deplezione dell'elemento passivante sono state eseguite prove di ossidazione isoterma in aria alla temperatura di 630 °C, dei campioni FeCrAl depositati su P91 per pack Cementation. Al termine di ciascun trattamento sono stati misurati i profili di concentrazione delle specie coinvolte, lo spessore dello strato in cui si è avuta diffusione di alluminio nel substrato, ed in particolare la concentrazione superficiale di alluminio per verificare che si sia mantenuta al di sopra della soglia critica al di sotto della quale non si forma lo strato passivante protettivo, che nel nostro caso è intorno al 6%wt. Si è osservata la formazione e la crescita della scaglia di allumina dello spessore di circa 100 nm con cinetica parabolica relativamente lenta, ad indicare la buona permeabilità all'ossigeno dello strato passivante. L'analisi in sezione trasversale dei campioni al microscopio elettronico a scansione non ha messo in evidenza variazioni della microstruttura. L'analisi del profilo di concentrazione per spettroscopia a dispersione di energia dei campioni in sezione trasversale ha mostrato una variazione della concentrazione superficiale di alluminio molto limitata, attorno alla frazione % in peso. I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2013/028.

Rivestimenti compositi Al_2O_3 amorfa/nanocristallina mediante tecniche di deposizione per ablazione laser

L'attività ha riguardato la deposizione di multistrati costituiti da un top layer di allumina amorfa deposta per PLD ed uno strato di buffer o bonding layer di composizione FeCrAlY in contatto col substrato prodotto per RF Sputtering (sputtering a radiofrequenza). In particolare, al fine di verificare la fattibilità di queste deposizioni sulle barre di combustibile, le attività di sintesi si sono focalizzate sulla messa a punto di un protocollo per la deposizione su provini cilindrici. I campioni, come rivelato dall'analisi al microscopio elettronico a scansione, hanno mostrato un rivestimento continuo di spessore pari a circa 5 µm, estremamente compatto, omogeneo e bene adeso al bonding layer, di spessore pari a circa 500-600 nm. Anche l'adesione del bonding layer al substrato si è rivelata molto buona. I rivestimenti sono stati sottoposti a prove di corrosione in piombo stagnante a 600°C fino a 1000 h in condizioni ossidanti e riducenti. In entrambi i casi si è vista una buona performance dal punto di vista della protezione del substrato. I rivestimenti depositati su acciaio austenitico 15-15 Ti, sono stati sottoposti a

trattamenti termici ciclici (25 cicli in aria con T_{min} 380°C e T_{max} 630°C). L'analisi degli spettri di diffrazione di raggi X effettuata dopo i cicli termici ha rilevato cha la fase allumina amorfa in parte cristallizza. L'analisi al microscopio elettronico a scansione del rivestimento dopo i cicli termici ha rivelato inoltre cricche e delaminazioni dal substrato in corrispondenza di bande di scorrimento nei cristalli del substrato. I risultati dell'attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/029.

Irraggiamenti con ioni pesanti

Per simulare la stabilità microstrutturale e dimensionale sotto irraggiamento neutronico dei materiali prodotti, sin dalla scorsa annualità, sono state avviate delle campagne di irraggiamento con ioni pesanti. Le attività hanno riguardato la caratterizzazione dei materiali irraggiati la scorsa annualità e la progettazione di nuove prove di irraggiamento.

Sono stati caratterizzati i campioni di allumina prodotti tramite PLD su substrati di acciaio austenitico 15-15 Ti irraggiati con ioni pesanti durante la campagna di irraggiamenti portata avanti presso la piattaforma sperimentale JANNUS dei centri di ricerca CEA di Saclay (SRMP) e di Orsay (CSNSM). Gli irraggiamenti sono stati effettuati a 600 °C a dosi crescenti fino a 150 dpa Le analisi morfologiche non hanno mostrato cedimenti importanti né delaminazioni del rivestimento. Le analisi microstrutturali al microscopio elettronico in trasmissione e per diffrazione di raggi X, hanno mostrato che a partire dalla dose di 20 dpa, nella struttura amorfa/nanocristallina del rivestimento, i domini cristallini cominciano a crescere raggiungendo dimensioni intorno ai 100 nm. Alla dose di 150 dpa il rivestimento è completamente cristallino con dimensioni dei cristalliti intorno ai 200 nm.

E' stata quindi progettata ed iniziata una campagna di irraggiamenti con ioni pesanti, presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale per la Fisica Nucleare (INFN). Sono state presentate due proposte di irraggiamento che hanno avuto una valutazione positiva da parte del comitato scientifico. In questo ambito è stato progettato e realizzato un portacampioni termostatato per poter eseguire irraggiamenti a temperatura costante da temperatura ambiente fino a 600 °C. Sul portacampioni è stato inoltre progettato e realizzato un sistema a Faraday Cup per la misura della corrente di ioni incidenti sul campione. Oggetto della campagna di irraggiamento sono i campioni con rivestimento composito Al_2O_3 amorfa/nanocristallina PLD + bonding layer a base FeCrAlY ed i campioni con rivestimenti FeCrAl + top allumina realizzati con tecnologia arc/sputtering PVD durante il PAR 2012/13.

Una prima sessione di irraggiamenti è stata fatta in luglio, la campagna di irraggiamenti continuerà dopo la fine del presente PAR.

Le attività di cui sopra sono state supportate dalla caratterizzazione con misure di microindentazione, misure di nanoindentazione, analisi per diffrazione di raggi X, prove di scratch, caratterizzazione al microscopio elettronico a scansione ed in trasmissione, spettrometria a dispersione di energia. I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR 2013/032

In maniera trasversale alle linee di attività di cui sopra si sono poi realizzate prove di caratterizzazione completa dei campioni che sono nel dettaglio:

- Microdurezza Vickers Nanoindentazione
- Prove di Scratch
- Analisi per diffrazione di raggi X
- Caratterizzazione al microscopio elettronico a scansione
- Analisi della composizione chimica per spettrometria a dispersione di energia

I risultati delle diverse prove di caratterizzazione eseguite sono illustrati nei rapporti RdS/PAR2013/030 e RdS/par2013/031.

Sviluppo di modelli basati sulle tecniche di dinamica molecolare per gli studi di corrosione

E' stato messo a punto un modello numerico basato sulla dinamica molecolare da principi primi in grado di simulare un sistema costituito da piombo liquido in contatto con uno strato di ferro a 875 K. Le prime simulazioni mostrano che il sistema lasciato libero di evolvere si va a collocare in una configurazione, molto stabile, nella quale viene a crearsi uno strato di atomi di piombo al di sopra della superficie di ferro che vanno a posizionarsi in modo da continuare il reticolo cristallino BCC del ferro, con lacune dovute alle differenze nel numero atomico dei due ioni. Questo comportamento induce uno stato di stress sugli strati superficiali del cristallo di ferro, che tende a spostare atomi superficiali di ferro dalle loro posizioni di equilibrio. In termini energetici questo comportamento rende meno stabile la superficie di ferro rendendola più facilmente prona ad essere modificata profondamente.

I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2013/033.

Relativamente alle prove di caratterizzare con prove termomeccaniche a lungo termine "Creep-Rupture" su materiali strutturali convenzionali (acciai austenitici e acciai ferritici/martensitici) ricoperti a base di FeAl, FeCrAl e TiN simulando le condizioni operative tipiche del sistema LFR, ENEA ha lavorato per la progettazione finale dell'attrezzatura di prova per i test in metallo liquido, realizzando i particolari dei disegni CAD.

Nell'attesa della realizzazione dell'attrezzatura di prova, avendo individuato come materiale prioritario il 15-15 Ti(Si), sono state eseguite delle prove preliminari nelle seguenti condizioni:

- 550°C; 300MPa; in aria;
- 550°C; 400MPa; in aria.

I risultati delle prove, descritti nel rapporto RdS/PAR2013/034, sono stati quindi elaborati e confrontati con i dati di un acciaio austenitico analogo, disponibili in letteratura.

Infine, relativamente agli acciai strutturali per applicazioni nucleari, grande interesse assumono gli acciai doppio stabilizzati (Ti, Nb) che hanno dimostrato grande stabilità al rigonfiamento e alla deformazione anelastica. Appartenenti alla famiglia dell'AISI 316 (es. 15-15 Ti), i doppio stabilizzati sono stati sviluppati da ENEA in collaborazione con il CEA per essere applicati quale materiale di guaina per i reattori veloci refrigerati al sodio. All'inizio degli anni '80, all'interno di un programma sperimentale svolto presso il Centro di Saclay, l'irraggiamento con elettroni (1 MeV HVEM) dimostrò l'efficacia della presenza simultanea di Ti e Nb sulla resistenza a gonfiamento di acciai 316 e 15-15. Questa evidenza sperimentale portò CEA ed ENEA ad avviare la produzione e la caratterizzazione della prima generazione di acciai doppio stabilizzati (DS). Un'ottimizzazione sulle composizioni della prima generazione portò ad una seconda generazione. I campioni degli acciai di questa seconda generazione vennero sottoposti ad irraggiamento con neutroni nell'ambito dell'esperimento "Supernova". I risultati ottenuti nell'esperimento Supernova in reattore Phénix, molto promettenti, furono ottenuti con un danno da irraggiamento di 89 dpa. Il confronto degli acciai austenitici doppio stabilizzati mostra l'effetto benefico di lavorazione a freddo, aumento della percentuale di Ni, stabilizzazione con Ti e Nb eseguita su acciai inossidabili seconda generazione. Il confronto tra micrografie mostra come il gonfiamento limitato degli acciai austenitici doppio stabilizzati sia coerente con la bassa quantità di cavità. Le proprietà a creep degli acciai doppio stabilizzati sono ottime se confrontate con quelle degli altri acciai austenitici 15-15, come ci si aspetta dalla doppia stabilizzazione con Ti e Nb, il cui effetto principale è proprio l'innalzamento delle proprietà a creep.

Si è pertanto arrivati alla produzione di un lingotto DS4 (50 kg) che ha seguito il seguente processo produttivo:

- Fusione e rifusione in vuoto (VIM process)
- Produzione di lingotti di laboratorio
- Ricottura di omogeneizzazione; 1200 °C per 2 h
- Analisi metalllografiche e chimiche
- Produzione di piatti per laminazione a caldo; spessore finale adatto ad ottenere 15 mm dopo la lavorazione a freddo
- Massima temperature di riscaldamento: 1150 °C
- Minima temperature di trattamento: 800 °C
- Controlli ad ultrasuoni and RX per scartare le parti difettose
- Trattamento finale prima della lavorazione a freddo: 1100 °C per 5 min, successivo raffreddamento in atmosfera di argon
- Lavorazione a freddo; rapporto di riduzione della sezione 20% con spessore finale 15 mm
- Analisi metalllografiche e chimiche.

Dal lingotto verranno prodotti dei campioni per prove di trazione, corrosione (esistono prove preliminari, eseguite nei laboratori del Brasimone, ma occorre ampliare la statistica), e analisi microstrutturale.

I risultati dell'attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/035.

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.

FN SPpA, sulla base delle indicazioni di input da parte ENEA/Ansaldo Nucleare, ha condotto le attività di studio e progettazione relative alla griglia spaziatrice per la realizzazione del mock-up di elemento di combustibile per reattore LFR in geometria esagonale (tipo ALFRED). In particolare si può affermare che in FN:

- è stata effettuata una revisione della configurazione di griglia spaziatrice sviluppata nella precedente annualità. Sulla base di scambi di valutazioni tecniche avvenute durante riunioni del "Tavolo Pesante" cui anche FN ha partecipato (Saluggia, dicembre 2013 e Lerici, marzo 2014), nonché in riunioni specificamente dedicate (Genova, marzo 2014), sono emerse riflessioni circa alcuni aspetti della tipologia di griglia proposta da FN nella precedente annualità a confronto con l'idea di input Ansaldo/ENEA. Mentre la griglia proposta da FN risultava più compatibile con problematiche realizzative, alcuni aspetti legati alla fluidodinamica indicavano come l'idea di input potesse essere inizialmente più idonea, sebbene la tipologia di griglia fosse meno resistente dal punto di vista meccanico e più onerosa come realizzazione e assemblaggio (anche e soprattutto in vista di una produzione di serie). Si è resa quindi necessaria una verifica a livello di calcoli preliminari dal punto di vista meccanico e fluidodinamico. Tale verifica ha portato alla definizione di una configurazione a singolo uncino, avente gli appoggi fissi costituiti da un contatto puntiforme e dalla larghezza di ciascuna striscia aumentata di 10 mm rispetto alla precedente in modo da rendere le singole componenti più resistenti (Figura 291);

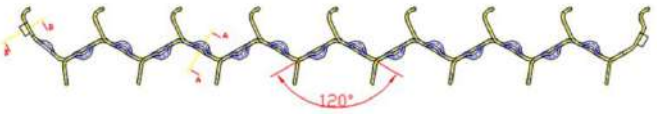


Figura 291. Nuova configurazione della griglia dopo stampaggio e piegatura - vista frontale componente 2

- è stata effettuata una valutazione del verso delle fibre del materiale rispetto alla direzione di piega; la direzione di laminazione risulta per la piega un fattore piuttosto influente, in quanto la piega effettuata parallelamente alla direzione di laminazione risulta la meno favorevole e può dare luogo a cricche. In questo caso occorre aumentare il raggio di piegatura. Anche la velocità di piega, quando questa avviene a temperatura ambiente, è importante ed occorre ridurla in modo da minimizzare la possibilità di esercitare un carico assimilabile ad una condizione di impatto che poterebbe ad una rottura fragile;
- sono stati valutati i limiti tecnologici delle tecniche prese in considerazione;
- è stata eseguita una prima valutazione delle problematiche di assemblaggio del fascio all'interno della scatola esagonale, giungendo alla modifica della parte terminale delle componenti di griglia allungando la linguetta che deve flettere nel momento dell'introduzione e poi rilasciarsi nel punto in cui trova la sua sede, agganciandosi così alla scatola esagonale;
- sono stati realizzati i disegni esecutivi della configurazione di griglia revisionata, sulla base dei quali poter procedere alla realizzazione degli stampi appositi;
- sono stati individuati i fornitori dell'acciaio necessario per la realizzazione dei prototipi;
- sono state valutate le tecniche ed i cicli di lavoro per giungere al componente finito, prendendo in considerazione due modalità: foto tranciatura chimica + stampaggio in più stadi, tranciatura e stampaggio attraverso lo stesso stampo di trancia e piega. Ovviamente, dato che le componenti di griglia sono tutte diverse per quanto riguarda le terminazioni, mentre la parte centrale si ripete modularmente, sono stati considerati stampi diversi con i quali poter realizzare poi in serie la griglia completa. Sono stati anche considerati calibri e tamponi appositi per effettuare la verifica delle angolazioni e dei raggi di curvatura;
- sono state effettuati test di piegatura e verifiche del comportamento del materiale;
- sono state effettuate analisi su materiali processati per foto tranciatura;
- è stata effettuata una ricerca di mercato per individuare ditte specializzate nella foto tranciatura chimica e nelle altre tecniche individuate (piegatura e stampaggio industriale), idonee dal punto di vista della capacità tecnica sia dal punto di vista della qualifica ad operare in un contesto di garanzia di qualità di livello nucleare. L'individuazione di tali ditte si colloca nell'ottica della verifica dell'industrializzazione del processo per la realizzazione della griglia in funzione dei limiti tecnologici individuati e delle caratteristiche di specifica della griglia derivanti dalla progettazione supportata dagli studi di fluidodinamica.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/036.

Per quanto riguarda le prove di corrosione in piombo stagnate, sono stati in primo luogo esaminati al SEM diversi campioni di acciai ricoperti con tecnica PVD. I ricoprimenti (TiN, FeAl e FeCrAl) sono stati realizzati dal CSM (Centro Sviluppo Materiali, Roma). I substrati ricoperti sono gli acciai 15-15Ti(Si), AISI316L e T91. L'analisi è stata effettuata per valutare la qualità del ricoprimento prima di effettuare prove di corrosione in piombo liquido.

In secondo luogo, due campioni di acciaio austenitico 15-15Ti(Si) nudo e due campioni di 15-15Ti(Si) ricoperto con TiN sono stati esposti in piombo liquido in condizioni di alto ossigeno disciolto (saturazione, 10-3 %w/w di O), alla temperatura di 550 °C e per 2000 ore, nelle capsule sperimentali KIT, analizzando la composizione della matrice metallica. La scelta di utilizzare gli acciai ricoperti con TiN è dovuta al fatto che, fra tutti i ricoprimenti prodotti mediante PVD, il TiN è risultato essere il più omogeneo e compatto dall'osservazione al SEM.

Osservazione al microscopio di acciai ricoperti mediante processo PVD

Dall'analisi pre-esposizione al SEM dei campioni ricoperti con tecnica PVD è emerso che i ricoprimenti non sono di buona qualità, in modo particolare quelli realizzati con FeAl e FeCrAl, in quanto sui campioni sono presenti numerose zone in cui il ricoprimento non aderisce perfettamente alla matrice o addirittura è assente. I ricoprimenti con TiN presentano invece meno difettosità. Lo spessore del ricoprimento di TiN è 5-10 µm.

Prove di corrosione a 2000 ore di 15-15Ti(Si) in Pb liquido con alto ossigeno

Dopo 2000 ore di esposizione il fenomeno corrosivo non coinvolge ancora l'intera superficie, ma si presenta con morfologia localizzata. Lo strato di ossido è disomogeneo e presenta al suo interno numerose penetrazioni di piombo. Al di sotto dell'ossido la matrice metallica è scavata, indicando la presenza di un fenomeno dissolutivo, come è tipico per gli acciai austenitici. Le zone corrose, comprensive dello strato di ossido e della zona di dissoluzione, può estendersi fino 25 µm. La zona di dissoluzione è di qualche µm di profondità nella matrice metallica. Per quanto riguarda la composizione della zona di corrosione si è riscontrato che:

- lo strato di ossidazione esterno è costituito principalmente da Fe, O e Mo, il ché è indice di uno strato costituito da ossidi di Fe e Mo;
- lo strato di ossidazione interno mostra un arricchimento di Ni per effetto della sua tendenza a dissolversi nel piombo;
- in entrambi gli strati di ossidazione è presente Pb (penetrazione);
- il Ti non varia nella composizione dei vari strati ed è verosimilmente presente sotto forma di globuli di carburo (effetto di stabilizzazione);
- non è chiaro l'effetto del Si, dato che la sua composizione non varia in modo caratteristico negli strati di ossidazione.

Infine, si è valutata la velocità di corrosione del 15-15Ti(Si) determinando la riduzione massima del diametro dei campioni a 2000 ore al microscopio ottico dimensionale. Dai valori di riduzione del diametro, si è ottenuta la riduzione dello spessore del campione e da quest'ultima la stima della velocità di corrosione riferita ad un anno. La velocità di corrosione annua così stimata per il 15-15Ti(Si) (tra 90 e 60 µm/anno) non è trascurabile in relazione al suo possibile impiego per il fuel cladding, tanto più se si considera che le prove sono state condotte in condizioni statiche e di alto ossigeno, che dovrebbero favorire una bassa velocità di corrosione. Tuttavia, poiché la stima è stata effettuata calcolando la riduzione massima del diametro, è necessario effettuare prove a tempi di esposizione più lunghi al fine di ottenere una stima più accurata della velocità di corrosione annua.

Prove di corrosione a 2000 ore di 15-15Ti(Si) ricoperto con TiN in Pb liquido con alto ossigeno

Dall'analisi dei campioni di 15-15Ti(Si) ricoperti con TiN si nota che nelle zone in cui il ricoprimento è compatto e ben aderente la matrice metallica è integra; in queste condizioni quindi il ricoprimento ha avuto efficacia come barriera anticorrosione. Per contro sono state identificate anche aree della matrice corrose dal piombo. Tali aree sono localizzate al sotto delle zone porose e discontinue del ricoprimento o dove il ricoprimento è assente.

Per quanto riguarda gli effetti della prova sul ricoprimento di TiN, l'analisi composizionale ottenuta mediante EDS ha mostrato una significativa quantità di Ti nello strato di piombo rimasto attaccato al ricoprimento al termine della prova, probabile indice di un fenomeno di degradazione del ricoprimento. In aggiunta, si è anche osservato un fenomeno di ossidazione sulla superficie esterna del ricoprimento di TiN a contatto con il piombo, come sta ad indicare l'elevata presenza di O e l'assenza di N. Ciò è riconducibile ad un fenomeno di decomposizione del nitruro di Ti e alla successiva formazione dell'ossido.

I dati riguardanti lo studio della resistenza all'ossidazione del TiN disponibili in letteratura si riferiscono per lo più a condizioni di ossidazione in ambiente aria calda, con un intervallo di temperatura minima di ossidazione compreso tra 450 e 700 °C. In considerazione di questi dati e dell'esito delle prove di corrosione del TiN in piombo liquido con alto ossigeno a 550°C, si può concludere che un ricoprimento di TiN, sottoposto a prove di corrosione, subisca una degradazione della sua struttura già a 550°C. Comunque, anche considerata la significativa difettosità generata dalla tecnica PVD, il ricoprimento di TiN ottenuto con questa tecnica non sembra essere adatto come ricoprimento protettivo da impiegare in piombo liquido.

A motivo dei risultati ottenuti per i ricoprimenti ottenuti con tecnica PVD, è stata sospesa l'attività di caratterizzazione in piombo liquido dei ricoprimenti ottenuti con questa tecnica (TiN, FeAl e FeCrAl). Si procederà invece con la caratterizzazione di ricoprimenti a base di tantalio, che verranno prodotti mediante processo CVD. I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/037.

Relativamente alla concettualizzazione di un nuovo impianto per il monitoraggio del rateo di corrosione su materiali strutturali operanti in piombo, il lavoro illustra le specifiche generali e concettuali per la progettazione di una "multipurpose facility" per prove con piombo liquido stagnante. Nello specifico, la facility serve per condurre studi sul controllo e il monitoraggio della chimica del piombo per applicazioni in LFR e ADS, con particolare attenzione alle seguenti tematiche:

- prove di corrosione di materiali:
  - in condizioni di alto e basso ossigeno disciolto
  - in presenza di oxygen getters
  - in presenza di soluto (effetto soluto/solvente)
- prove per componenti del sistema:
  - sensori per l'ossigeno disciolto in piombo liquido,
  - sensori per l'ossigeno per la determinazione nella fase gas,
  - igrometri per la determinazione di acqua nella fase gas.

Il corpo principale della facility è costituito da un cilindro di acciaio. Un crogiolo di allumina, alloggiato all'interno del cilindro, serve da contenitore del piombo liquido ed evita il contatto tra il metallo e la parete di acciaio del cilindro. Il riscaldamento del sistema è ottenuto per mezzo di una resistenza avvolta sulla superficie esterna del cilindro. Il coperchio del cilindro è dotato di fori per l'inserimento nel piombo dei componenti necessari per l'esecuzione delle prove:

- portacampione (o più portacampioni),
- termocoppia interna per il bagno di piombo,
- sensore elettrochimico per la determinazione dell'ossigeno in fase liquida,
- cannula di gorgogliamento del cover gas,
- agitatore per l'omogeneizzazione del bagno,
- dispositivo di prelievo del piombo liquido per analisi chimica,
- dispositivi vari (oxygen getters, barrette di metallo per prove soluto/solvente, ecc.).

Alcuni requisiti di progetto fondamentali per la facility:

- possibilità di testare più di un campione nello stesso bagno di piombo (impiego di più portacampioni o di un portacampione per più provini),
- sistema di campionamento del metallo liquido (campionamento automatico oppure tramite pipette in vetro usa e getta),
- sistema di agitazione del bagno di piombo (agitazione meccanica, gorgogliamento del gas,…), per ottimizzare la dispersione dell'idrogeno e la disossidazione del piombo liquido e omogeneizzare il metallo liquido in caso di prelievo,
- sistema di controllo e di circolazione del cover gas (generatore di idrogeno, analizzatori gas, igrometri, flussimetri).
- possibilità di inserire altri dispositivi di prova (es. oxygen getters),
- evitare contaminazioni da contatto diretto tra piombo e dispositivi in acciaio (impiego di allumina o di acciai ricoperti con materiale insolubile es, Ta, Al),

I risultati dell'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/038.

Per quanto riguarda l'impianto LECOR si è provveduto come previsto ad aggiornarlo per prove di corrosione in piombo fluente e in controllo dell'ossigeno, elaborando una nuova matrice di prova [rapporto RdS/PAR2013/039]. Le prove di corrosione in piombo fluente saranno oggetto del prossimo PAR.

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. ENEA di Brasimone (Figura 292).

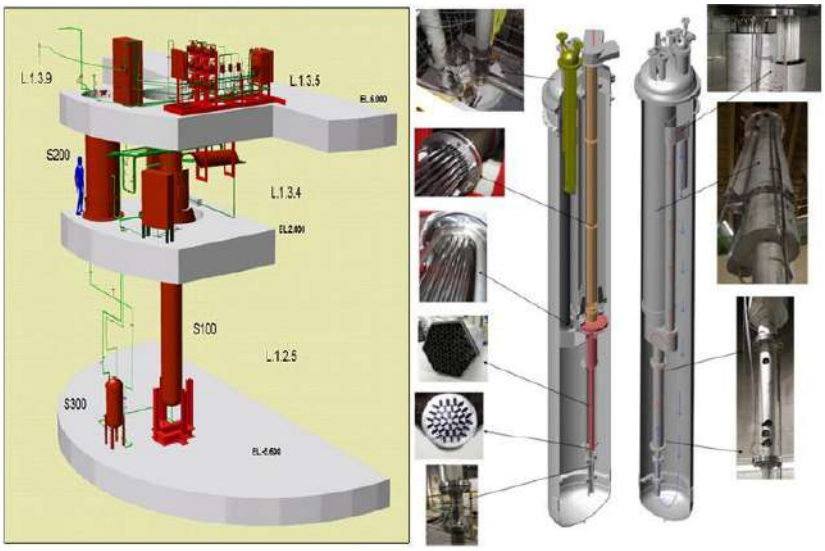


Figura 292. Facility CIRCE

Il lavoro prodotto documenta la fase di montaggio, strumentazione e analisi preliminare mediante codice termoidraulico di sistema (RELAP-5.3) della sezione di prova HERO. Essa consiste di un bundle in scatola esagonale di 7 tubi a doppia parete a baionetta rappresentativi del generatore di vapore del reattore ALFRED (figura 293).

La sezione di prova è stata montata su CIRCE ed è concepita per essere uno strumento di supporto allo sviluppo del generatore di vapore di ALFRED e alla validazione di codici principalmente di tipo termoidraulica di sistema grazie ad un'accurata scelta della strumentazione.



Figura 293. Dettagli della sezione di prova HERO

Lo studio di questa tipologia innovativa di generatore di vapore si basa sul sostanziale aumento apportato del margine di sicurezza di reattori a piscina quali LFR ed ALFRED. Infatti, in tal tipo di reattore, il generatore di vapore è parte integrante dell'isola nucleare e costituisce l'interfaccia principale fra l'isola stessa e il secondario. La presenza di una doppia parete di separazione a meato anulare monitorato consente di ridurre notevolmente la probabilità di rottura di un tubo del generatore con conseguente iterazione moderatore - refrigerante secondario.

L'attività svolta da ENEA è collegata alle precedenti due annualità ed è consistita delle seguenti azioni:

- Costruzione e fornitura del fascio tubiero comprensivo delle griglie e di parte della strumentazione interna ai tubi da parte di CRIOTEC. Diversi feedback tra ENEA e CRIOTEC hanno reso necessarie due principali modifiche al design iniziale:
  - la polvere ad alta conducibilità riempitiva del meato anulare è stata cambiata da Si-C ad AISI-316 a seguito di prove sperimentali di conducibilità termica effettuate da ENEA nella facility TxP.
  - il materiale isolante prescelto per degradare lo scambio termico tra acqua di alimento dei tubi (in discesa) e vapore surriscaldato (ascendente), ZRICOFOAM ha rivelato sostanziali problematiche di adesione a superfici di acciaio cilindriche ed è stato pertanto cambiato realizzando un meato anulare in leggero vuoto.
- Ordine, costruzione e fornitura della scatola esagonale da parte di LIMAIONX.
- Assemblaggio della sezione da parte di ENEA incluse tutte le termocoppie esterne ai tubi.
- Realizzazione di un modello preliminare di HERO mediante codice RELAP-5. Tale modello ha indicato che la temperatura del vapore surriscaldato ottenibile in condizioni nominali si aggirerà attorno ai 400 °C. Tale valore è 50 °C al di sotto del target di ALFRED tuttavia è ritenuto accettabile per un mock-up sperimentale quale HERO.

Il design e l'approvvigionamento di componentistica del circuito secondario è stata avviata e si prevede di inserirla nella futura annualità quale naturale proseguimento di codesta linea di R&D. I risultati prodotti sono descritti nel report RdS/PAR2013/040 .

Con riferimento alla caratterizzazione sperimentale del GV prototipico di ALFRED tramite la sezione di prova HERO, uno dei problemi irrisolti è rappresentato dalla misura, con precisione accettabile, del livello raggiunto dalle fasi liquida e vapore all'interno del tubo a baionetta. Si è quindi effettuato uno studio teorico e sperimentale per l'applicazione di una nuova tecnica riflettometrica per la misura del livello. In particolare, l'attività di ricerca è stata suddivisa nelle seguenti fasi:

- studio teorico sull'analisi TDR per la misura di livello di un sistema bifase;
- simulazioni a supporto dello studio di fattibilità e della progettazione dell'esperimento del misuratore;
- fase di pre-test: esperimento ridotto a pressione e temperatura ambiente per la valutazione delle problematiche di base dell'esperimento e per lo sviluppo dei relativi sistemi di controllo.

Nella prima fase si è testato nella maniera più rapida e semplice possibile, la validità generale delle considerazioni teoriche iniziali. Il problema bifasico non viene ancora affrontato ma vengono invece testate le risposte del sensore in condizioni sia statiche che dinamiche. Nel presente PAR si è implementata un'indagine teorica con studi preliminari sulla possibilità di applicare tecniche riflettometriche per la misura di livello di un sistema bifase con eventuali simulazioni a supporto dello studio di fattibilità e della progettazione dell'esperimento. Si è inoltre definita la strumentazione necessaria.

Si sono poi avviate indagini sperimentali in condizioni statiche. Il recipiente in plexiglass che contiene il sensore viene riempito di acqua a 20 °C fino a vari livelli predeterminati. Grazie all'uso di un oscilloscopio digitale con capacità di generazione di segnale e analisi TDR/TDT, confrontando i risultati del sensore con le corrispondenti misure che è possibile ottenere otticamente, se ne verifica la risposta in condizioni di misura statiche.

Successivamente si procederà con un'indagine sperimentale in condizioni dinamiche. Il recipiente in plexiglass che contiene il sensore viene connesso a un loop idraulico costituito da pompa a flusso continuo con bassissima pulsatilità, recipiente buffer, rubinetto e tubi di raccordo. Il loop, riempito di acqua a 20°C, viene fatto funzionare in condizioni di variazione dinamica del livello agendo sia sulla pompa che sul rubinetto. In tali condizioni dinamiche, usando l'oscilloscopio sopra menzionato, si verifica la risposta del sensore.

Alla fine di questa fase si potrà poi procedere con la realizzazione di una sezione sperimentale a pressioni e temperature esercizio in cui si testerà la riproducibilità dei risultati sperimentali ottenuti al punto precedente con uno studio particolareggiato del problema bifasico. A tal fine si realizzerà un loop termo-idraulico per realizzare le condizioni sperimentali d'esercizio.

I risultati dell'attività sono descritti nel report RdS/PAR2013/041.

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termofluidodinamica si è inoltre avviato un filone di ricerca sull'investigazione analitico - sperimentale dell'interazione metallo liquido acqua in supporto alla caratterizzazione di generatori di vapore per sistemi LFR, in sinergia con progetti europei quali LEADER e MAXSIMA del VII Programma Quadro Euratom, a cui l'ENEA partecipa attivamente.

L'attività consiste nella progettazione delle prove sperimentali di interazione su larga scala tra leghe di piombo ed acqua in pressione (fino a 16 bar), anche mediante modifiche ed aggiornamenti dell'impianto CIRCE dell'ENEA Brasimone ed una definizione delle condizioni operative. L'attività prevede inoltre l'esecuzione di simulazioni di pre- e post-test con codici in grado di simulare dinamiche multi-fluido e multifase a più campi di velocità.

Le implicazioni investigate dell'evento SGTR comprendono la propagazione delle onde di pressione nel generatore di vapore, l'effetto di smorzamento delle stesse ad opera degli elementi strutturali, la propagazione della rottura di un tubo a quelli circostanti, il comportamento dei sistemi di sicurezza, il trascinamento del vapore ad opera del metallo liquido fluente e la formazione di impurità solide.

Il lavoro in questa prima annualità prevede la specifica tecnica di fornitura e collaudo del coperchio del serbatoio S100 dell'impianto CIRCE, per la campagna sperimentale SGTR [rapporto RdS/PAR2013/042]. La realizzazione di tale componente si rende necessaria al fine di supportare la pressurizzazione di S100 (pressione di progetto 8 barg) ad opera dell'evaporazione dell'acqua iniettata leggermente sottoraffreddata (16 bar, 200°C) nella piscina di LBE liquido (350°C, con un massimo di sovrappressione del gas di copertura di 0.5 bar). Tali parametri sono definiti in conformità ai dati di progetto disponibili del reattore MYRRHA.

Il coperchio, di cui è stato realizzato il progetto concettuale, assolve al compito di supportare la sezione di prova immersa parzialmente nella piscina di LBE di S100 ed ospitare le penetrazioni per le apparecchiature e le

strumentazioni implementate. Il coperchio presenta una grande penetrazione con bocchello da 16" destinata al collegamento della pompa centrifuga, un bocchello da 4" per il passaggio della strumentazione ed uno da 3" per consentire l'alimentazione di acqua e argon alla sezione di prova. Sono inoltre presenti quattro bocchelli che consentono il passaggio di quattro tubi d'acqua, messi in trazione dall'esterno per realizzare le quattro iniezione d'acqua costituenti i quattro eventi di SGTR, realizzati uno alla volta. Il coperchio è dotato inoltre di penetrazioni aventi minore dimensione per il passaggio di misuratori di livello, riscaldatori elettrici ed altra strumentazione. Il coperchio consente il corretto posizionamento dei componenti della sezione di prova e della strumentazione, atti a garantire il rispetto delle condizioni al contorno di esecuzione delle prove sperimentali e di acquisire i dati necessari alla loro analisi dettagliata e alla validazione dei codici impiegati nella loro simulazione.

Per quanto riguarda l'accoppiamento fra codici di sistema e codici CFD, come pianificato è stata svolta un'attività volta alla qualifica e al miglioramento del *tool* di accoppiamento precedentemente sviluppato nell'ambito dei PAR 2011 e 2012.

La rilevanza scientifica e tecnologica di tale contributo risiede nel fatto che la disponibilità di strumenti e metodologie qualificati per l'analisi termofluidodinamica che integrino capacità di simulazione *multi-scale*, permettono un'analisi più accurata dei sistemi refrigeranti per reattori nucleari (sia a supporto delle valutazioni di sicurezza che della progettazione) laddove vi sia un'interazione stretta tra i fenomeni che interessano il "sistema" (ad esempio la circolazione naturale nel circuito refrigerante di un reattore nucleare, ecc.) e quelli "locali" e intrinsecamente tridimensionali (come lo scambio termico tra refrigerante e barrette di combustibile, ecc.)

L'attività svolta è stata incentrata essenzialmente sulla simulazione, ai fini della validazione, di un esperimento che offrisse, oltre ai dati necessari per il confronto, anche un interesse pratico in relazione alla tecnologia dei refrigeranti. A tale scopo si è fatto riferimento ad uno degli esperimenti che sono stati condotti in passato sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (ENEA Brasimone) nell'ambito di una campagna di studi sulla circolazione naturale e/o assistita di una lega eutettica piombo-bismuto in un loop chiuso (essendo la circolazione naturale indotta da un simulatore di barrette di combustibile, riscaldato elettricamente, e da uno scambiatore di calore, ed essendo la circolazione "assistita" ottenuta mediante iniezione di argon).

Gli strumenti utilizzati sono il codice di sistema RELAP5-3D v.4.1.3, il codice CFD ANSYS CFX v15.0, ed il *tool* di accoppiamento precedentemente sviluppato, comprensivo di varie routine e un'interfaccia grafica. Il lavoro ha previsto i seguenti passi:

- simulazione 1D "stand-alone" di un esperimento NACIE mediante RELAP. Ciò ha richiesto lo sviluppo di una nodalizzazione (modello monodimensionale) ad hoc del circuito, ed una messa a punto a fronte dei dati sperimentali attraverso un procedimento iterativo di analisi, confronto ed aggiustamento di molteplici parametri;
- sviluppo di un modello CFD (griglia di calcolo & set-up di simulazione stand-alone) della parte di loop comprendente il fuel pin simulator, per la quale si è inteso effettuare un'analisi termofluidodinamica più dettagliata (3D). Ciò ha richiesto attività di modellazione geometrica, sviluppo e test di alcune mesh, sviluppo di un input CFX e relativo "collaudo" mediante calcoli di verifica;
- Predisposizione dell'accoppiamento two-way RELAP-CFX. Ciò ha richiesto modifiche alla nodalizzazione RELAP (per "rimuovere" la parte da simulare con CFX e per creare le interfacce per lo scambio di dati tra i due domini di calcolo durante la simulazione accoppiata), alcuni aggiustamenti al tool di accoppiamento e all'interfaccia grafica, e molteplici prove di simulazione;
- esecuzione del calcolo accoppiato; confronto ed analisi dei risultati. Questa fase ha richiesto soprattutto lunghi tempi di calcolo ed un adeguato controllo della convergenza numerica.

I risultati ottenuti dalla simulazione accoppiata sono consistenti con quelli ottenuti dalla simulazione 1D stand-alone, il che costituisce ulteriore prova della validità del tool di accoppiamento e della sua applicabilità all'analisi termoidraulica di sistemi a metalli liquidi in circolazione naturale. Naturalmente i dati utilizzati non sono *CFD-grade* e non sono utilizzabili per una validazione delle capacità di simulazione del modello CFX, cosa che per altro esula dagli obiettivi dell'attività e per la quale esiste comunque ampia bibliografia. I risultati di quest'attività sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/043.

Inoltre, la metodologia di calcolo accoppiata tra codici di sistema - codici CFD (in particolare tra RELAP5 e Ansys Fluent) sviluppata nell'ambito dell'Accordo di programma PAR 2012, è stata utilizzata per la simulazione di un test sperimentale in circolazione naturale (TEST 301) eseguito sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (Natural Circulation Experiment) situata presso il Centro di Ricerca Brasimone. La temperatura iniziale dell'eutettico piombo-bismuto (LBE) contenuto all'interno dell'apparecchiatura sperimentale ad inizio esperimento è circa 250-300 °C. Nei primi 262 s di transitorio la potenza termica fornita alla sezione scaldante della facility incrementa

linearmente fino a raggiungere 21,5 kW dopodiché resta costante sino alla fine del transitorio. La simulazione effettuata riproduce il transitorio descritto sia mediante l'uso del codice di sistema RELAP5 sia mediante l'applicazione della metodologia di calcolo accoppiata RELAP5\Fluent. Il dominio utilizzato per la parte di simulazione CFD è un dominio bidimensionale assialsimmetrico discretizzato con una mesh strutturata di circa 10000 nodi. I risultati ottenuti sia dal calcolo RELAP che dal calcolo accoppiato sono stati confrontati con i risultati sperimentali mostrando un buon accordo con differenze inferiori al 2% riguardo alle temperature in ingresso e in uscita dello scambiatore di calore e in ingresso e uscita della sezione scaldante. Buon accordo è stato trovato anche per quanto riguarda il calcolo della portata di LBE all'interno del loop (differenze ancora inferiori al 2%).

Successivamente la metodologia di calcolo implementata e validata per mezzo di confronto con dati sperimentali è stata ulteriormente sviluppata in modo tale da migliorare la stabilità del calcolo e contemporaneamente ridurre il tempo del calcolo stesso.

In particolare, si è deciso di sviluppare una metodologia implicita di calcolo accoppiato dove per ciascun time step vengono ripetuti i calcoli aggiornando le condizioni al contorno fino al raggiungimento di una convergenza dei dati scambiati tra i due codici utilizzati (pressioni, portate e temperature). Grazie alla maggior stabilità del modello sviluppato si è potuto utilizzare time step cinque volte maggiori rispetto alla stessa simulazione effettuata con il modello esplicito. Al fine di ridurre ulteriormente il tempo di calcolo si è proceduto alla parallelizzazione della User Defined Funtion scritta in ambiente Fluent allo scopo di ricevere e inviare i dati relativi alle condizioni al contorno che vengono scambiate con il codice di sistema RELAP5. Grazie a tale parallelizzazione la parte di programma di calcolo relativa al codice CFD Fluent può utilizzare multiprocessori che lavorino in parallelo riducendo in modo significativo il tempo di calcolo.

Lo schema di calcolo implicito è stato poi utilizzato per simulare una prova sperimentale (TEST 206) eseguita sull'apparecchiatura sperimentale NACIE. Tale prova è rappresentativa di un test in circolazione forzata con variazioni della portata di LBE legate a variazioni della portata di gas argon iniettato nel circuito per promuovere la circolazione (gas enhanced circulation) in condizioni adiabatiche. Sono state effettuate simulazioni sia utilizzando un dominio bidimensionale assial-simmetrico sia un dominio tridimensionale simmetrico (per la parte di calcolo relativa al codice CFD). I risultati ottenuti sono stati confrontati sia con i risultati sperimentali che con i risultati ottenuti dallo stesso calcolo ma utilizzando lo schema esplicito di calcolo accoppiato sviluppato nell' ambito dell'AdP 2012, ottenendo un ottimo accordo tra i dati sia calcolati che sperimentali con differenze inferiori al 10 % relativamente al calcolo della portata di LBE nel circuito. Il tempo di calcolo con la nuova metodologia risulta significativamente ridotto sia per il time step maggiore reso possibile dal nuovo schema implicito sviluppato sia grazie all'utilizzo di calcolo parallelo per la parte del calcolo relativa al dominio CFD.

I risultati prodotti sono descritti nel rapporto RdS/PAR2013/044.

Relativamente allo sviluppo del codice FEM-LCORE, il lavoro prodotto illustra i progressi compiuti nell'integrazione del codice di calcolo FEM-LCORE nella piattaforma SALOME. Negli anni precedenti il codice FEM-LCORE è stato sviluppato per la simulazione e il design di reattori di IV generazione raffreddati a piombo fuso nell'ambito dell'approccio multiscala.

Moduli 1-D e 3-D sono stati creati per simulare il circuito primario. Il core del reattore viene modellato come un mezzo poroso perché una simulazione dettagliata di ogni singolo sotto-canale all'interno degli elementi di combustibile è ancora al di fuori delle capacità computazionali attuali. Un modello semplificato per il congelamento del piombo è stato introdotto per utilizzare il codice anche in scenari di interesse per la sicurezza di impianto.

SALOME è un tool open-source sviluppato nell'ambito di diversi progetti europei (NURESIM, NURISP, NURESAFE) che mette a disposizione diversi moduli per la generazione di mesh, analisi di risultati e gestione di simulazioni numeriche, in particolare mettendo in comunicazione codici differenti con un'interfaccia unificata.

L'attività ha riguardato l'installazione, il test e lo sviluppo all'interno della piattaforma di un nuovo modulo che permetta la comunicazione tra il codice FEM-LCORE e SALOME. In questa maniera sarà quindi possibile interfacciare il codice con tutti gli altri codici che sono già stati interfacciati con la piattaforma, in particolare i codici di sistema come CATHARE.

L'integrazione del codice nella piattaforma SALOME richiede la generazione di un'interfaccia basata sulla libreria MEDMem che uniforma le strutture dati tra i differenti codici di calcolo. I codici dialogano direttamente con la piattaforma che poi provvede ad indirizzare le informazioni verso il codice ricevente. Questo approccio garantisce una scalabilità al crescere del numero di codici, che devono essere il grado di parlare solo con la piattaforma per sfruttare a pieno ogni altro codice già interfacciato.

La libreria MEDMem mette a disposizione anche un formato di file (formato MED) che è basato sulla libreria HDF5, garantendo così la portabilità su tutte le architetture hardware disponibili. La sua interfaccia mette a disposizione strutture dati in grado di ospitare mesh computazionali e campi numerici ad esse associate, che sono poi distribuiti da SALOME con un'interfaccia di comunicazione che utilizza I protocolli CORBA e MPI.

Il codice FEM-LCORE è stato arricchito di una interfaccia di comunicazione basandosi sul modello offerto dall'interfaccia per la libreria open-source libMesh.

I modelli numerici implementati riguardano l'equazione del calore, quella di elasticità lineare e le equazioni di Navier-Stokes mono-dimensionali, bi-dimensionali e tri-dimensionali. Nel rapporto sono presentate simulazioni accoppiate di tipo 3D-CFD/3D-CFD per le equazioni di Navier-Stokes e dell'energia nelle quali l'interfaccia viene utilizzata per trasferire dati riguardanti la generazione di calore e perdite di carico.

Dettagli sull'integrazione del codice FEM-LCORE nella piattaforma SALOME sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/045.

Per quanto riguarda la validazione del codice di sistema CATHARE come tool di supporto alla progettazione, è stata avviata una collaborazione tra ENEA e CEA che ha riguardato la modifica del codice per simulare reattori raffreddati a metallo liquido pesante. Questo codice nato per LWR (Light Water Reactor) è stato modificato per trattare diverse tipologie di refrigeranti tra cui il sodio, inoltre, fa parte di una piattaforma di simulazione in fase di sviluppo (SALOME) che comprende codici CFD, codici termomeccanici e neutronici, che in prospettiva potrebbe diventare un riferimento per gli studi di sicurezza anche di reattori innovativi di IV generazione.

Le proprietà termofisiche implementate sotto forma di correlazioni provengono dall'Handbook di riferimento per le caratteristiche dei metalli liquidi. All'interno della stessa annualità, e nelle successive, ha avuto inizio l'attività di verifica e validazione del codice modificato attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti dalla facility Sudcoreana HELIOS, forniti all'interno del benchmark internazionale LACANES a cui ENEA partecipa con il codice RELAP5, e dalla facility italiana NACIE presso i laboratori ENEA Brasimone. Durante queste attività, CATHARE ha dimostrato buone capacità di simulazione sia in convezione forzata che naturale, con una tendenza a sovrastimare fino al 10% le portate in circolazione naturale rispetto a quelle rilevate da RELAP5.

Nella presente annualità, l'attività di validazione è proseguita con l'ausilio di nuovi dati provenienti da una recente campagna sperimentale svolta sulla facility NACIE, finalizzata a testare un nuovo misuratore di flusso a induzione per metalli liquidi. Alcuni test della campagna sperimentale sono entrati a far parte del benchmark LACANES [rapporto RdS/PAR2013/046]. Lo scopo è stato quello di verificare la capacità e i limiti del codice nel riprodurre test integrali su un impianto sperimentale, principalmente in condizioni di circolazione naturale, anche in confronto con i risultati delle simulazioni RELAP5 svolte all'interno del benchmark. In particolare è stata testata l'ultima versione del codice, CATHAREv2.5_3mod2.1, che è la prima versione provvista nativamente delle proprietà termodinamiche dei metalli liquidi pesanti, rilasciata ufficialmente dal team di sviluppo. L'attività è stata svolta da solo personale ENEA.

Il lavoro è stato suddiviso in due obiettivi; il primo ha riguardato la verifica delle perdite di carico (DP) valutate da CATHARE in confronto con RELAP5 in regime stazionario sia di circolazione naturale che forzata, il secondo ha riguardato la simulazione dinamica di un test in circolazione naturale confrontato con i dati sperimentali. Qui si ricorda che i dati sperimentali non comprendono misurazioni di pressione o DP, per cui la valutazione delle perdite di carico può procedere solo con un approccio codice-a-codice.

I test della matrice di prova presi in considerazione sono il Test 301 in circolazione naturale e il test 206 in circolazione forzata con la tecnica del gas-lifting, cioè per iniezione di gas incondensabile (Argon). Dato il limite intrinseco di CATHARE nel trattamento di incondensabili dispersi nella matrice metallica già evidenziato nelle precedenti annualità, il Test 206 è stato simulato con una pompa elettromagnetica e la portata di circolazione è stata imposta pari a quella valutata da RELAP5.

Il confronto delle perdite di carico nel test in circolazione naturale ha dimostrato una generale sovrastima delle perdite di carico simulate da CATHARE (+20% rispetto a RELAP5), solo parzialmente giustificabile dalla maggiore portata di circolazione (+2%). Parte del problema è riconducibile alla differenza di densità di piombo-bismuto in funzione della temperatura implementate nei due codici, quindi alle proprietà termodinamiche provenienti dal Soft-Sphere Model per RELAP5 e dall'Handbook per CATHARE. In particolare, nel range di temperature dei test, la densità di RELAP5 è sempre inferiore a quella di CATHARE ma soprattutto la curva di densità in CATHARE ha una pendenza superiore. Questo comporta che a parità di temperature in gioco tra gamba calda e gamba fredda, CATHARE valuta una superiore driving-force dovuta al peso delle due colonne termiche. Da qui segue la maggior portata di CATHARE e parte della differenza sui DP. Il secondo importante aspetto da considerare sono le differenze proprie dei codici nel calcolo delle perdite di carico distribuite che sono sempre sovrastimate da

CATHARE, nonostante i fattori di frizione liquido/parete siano inferiori a RELAP5. Questo comportamento è riscontrabile anche nel Test 206 dove le portate sono uguali. Nonostante queste considerazioni sulle perdite di carico, le portate in circolazione naturale valutate da CATHARE (4,91 kg/s) e da RELAP5 (4,81 kg/s) sono molto prossime alla stima di portata reale valutata con un bilancio termico (4.65 kg/s).

Nella simulazione del Test 301, le principali fonti di incertezza nelle simulazioni riguardavano la mancanza di informazioni sulle procedure di prova, la conducibilità della polvere di acciaio posta nell'intercapedine tra primario e secondario, la posizione dei riscaldatori lungo il loop e il loro tempo di funzionamento. CATHARE si è dimostrato capace di approssimare sia qualitativamente che quantitativamente gli andamenti delle principali grandezze fisiche rilevate durante il transitorio, e le simulazioni sono state migliorate a valle di alcune assunzioni fatte sulla potenza fornita dai preriscaldatori. Solo nella fase di spegnimento della canna scaldante, non è stato possibile riprodurre un corretto scambio termico con il lato secondario ottenendo buoni risultati solo da un punto di vista qualitativo. Per migliorare la simulazione di questa fase sarebbe necessario un supporto aggiuntivo alla comprensione del comportamento del circuito secondario. Ciononostante, si può affermare che CATHARE si è dimostrato capace di simulare in modo soddisfacente il transitorio di circolazione naturale della facility integrale NACIE.

Infine, per quanto concerne il codice FRENETIC si è provveduto alla validazione del codice termoidraulico, mediante code-to-code benchmark utilizzando i dati sperimentali disponibili dal reattore veloce a sodio EBR-II. Relativamente al moduli di neutronica, il calcolo del flusso aggiunto è stato implementato nel modulo neutronico NE, migliorando il calcolo dei parametri cinetici. Il modulo è stato poi verificato adottando test-case standard per calcoli neutronici. Dettagli su quest'attività sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/047.

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 CR Brasimone.

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 conduce in ambito europeo.

In particolare è stato realizzato il circuito secondario ad acqua in pressione (100 bar) dell'impianto (Figura 294). 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. Il lavoro svolto è descritto nel rapporto RdS/PAR2013/048.



Figura 294. circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido HELENA

Relativamente all'up-grade dell' impianto NACIE si è elaborata la specifica tecnica di fornitura installazione e collaudo del circuito secondario ad acqua in pressione (16 bar) dell'impianto NACIE in configurazione di upgrade (NACIE-UP) [rapporto RdS/PAR2013/049].

L'impianto a metallo liquido pesante NACIE-UP è stato definito e progettato con lo scopo di realizzare una "multipurpose facility" che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo-bismuto (LBE) fluente. 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 a gas. In particolare, gli ambiti nel quale si inserisce l'attività di ricerca e sviluppo prevista sull'impianto NACIE-UP, riguardano:

- caratterizzazione scambio termico in sistemi a metallo liquido pesante;
- termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti;
- caratterizzazione componenti prototipici;
- qualifica e caratterizzazione strumentazione;
- qualifica e validazione codici di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD);
- qualifica e validazione codici di sistema.

La parte dell'upgrade che riguarda il circuito primario(LBE) ed il sistema di Fill&Drain è stato già realizzato. I dettagli della fornitura di questa seconda parte dell'upgrade vengono descritti attraverso i sottosistemi principali:

- circuito secondario (acqua in pressione 16 bar);
- componenti, sistemi e strumentazione di servizio.

Il circuito secondario comprende il piping, le valvole attuate pneumaticamente, la pompa di circolazione, l'aerotermo ed il pressurizzatore compreso di valvola di sicurezza (Figura 294). Fasce scaldanti poste lungo una linea del piping consentono di regolare la temperatura del secondario secondo le esigenze di impianto. Sono previste anche delle valvole manuali di drenaggio e riempimento e strumentazione ausiliaria (termocoppie, sonde di livello, trasduttori di pressione). Il pressurizzatore è inoltre dotato di linee di carico e scarico gas per la pressurizzazione interrotte da elettrovalvole comandate da sistema di controllo. Il riduttore di pressione a doppio stadio consente un elevato grado di stabilità della pressione in uscita.



Figura 295. Circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido NACIE

Il secondario dell'impianto NACIE-UP è stato realizzato presso l'edificio PEC, compreso di supporti per le dilatazioni termiche e certificazione per i componenti in pressione soggetti a PED (pressurizzatore). La campagna sperimentale con l'utilizzo del circuito stesso è prevista per Dicembre 2014.

Infine, relativamente agli studi di solidificazione, è stata definita e concettualizzata la facility a metallo liquido pesante SOLIDX (SOLIDification eXperiment), con lo scopo di realizzare una prima apparecchiatura che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente, investigando il fenomeno del congelamento del metallo liquido [rapporto RdS/PAR2013/050]. La facility utilizzerà direttamente il piombo come fluido, lavorando quindi a temperature elevate a cavallo dei 330 °C (Temperatura di congelamento). Essa è costituita principalmente da:

- il serbatoio di prova strumentato S100;
- il sistema di fill&drain composto (linea di fill&drain, valvola linea drenaggio);
- serbatoio di stoccaggio S200.

Il serbatoio di prova S100 costituisce la vera e propria sezione di prova all'interno del quale verrà congelato il piombo durante la campagna sperimentale. Il serbatoio è composto da tre tubi concentrici con il piombo all'interno del tubo di diametro inferiore e della polvere di acciaio nel primo gap. Il gap esterno è invece refrigerato con acqua alla pressione di rete. La presenza simultanea di due elementi scaldanti da 2500 W posti in posizione asimmetrica e di 4 settori refrigerabili separatamente, consentono un a grande varietà di condizioni sperimentali. 64 termocoppie poste su 16 livelli monitorano il fluido internamente e consentono di stabilire con buona approssimazione la posizione del fronte di solidificazione. Una specola posta sulla flangia superiore consentirà di potere osservare il pelo libero del piombo. La facility è stata progettata in modo da essere completamente smontabile con la strumentazione termocoppie appoggiata a tubi pieni saldati alla flangia superiore. In tal modo si garantisce la facilità di gestione e di upgrade.

Il prosieguo dell'attività per la prossima annualità consisterà nella realizzazione di una campagna di prove sperimentali sul fenomeno della solidificazione del piombo.

d. Comunicazione e diffusione dei risultati

Dal 21 al 22 Novembre 2013, presso il CR ENEA Brasimone, si è tenuto il Workshop tematico "LFR-GEN IV Stato attuale della tecnologia e prospettive di sviluppo", organizzato da ENEA in collaborazione con le principali università italiane che svolgono attività di ricerca in campo nucleare.

Il Workshop, promosso nell'ambito delle attività inerenti la Linea Progettuale 2 "Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione" dell' AdP MSE-ENEA, è stato finalizzato ad:

- analizzare lo stato progettuale della tecnologia dei sistemi LFR partendo dal lavoro svolto in ambito ADP;
- supportare la programmazione delle attività future, definendo le priorità di intervento in ambito italiano ed europeo;
- armonizzazione le strategie di sviluppo mediante l'incontro di tutti gli stakeholder italiani.

Il duplice obiettivo del Workshop è stato dunque quello di condividere lo stato dell'arte dei sistemi LFR tra gli stakeholder italiani definendo al contempo, in maniera condivisa e sinergica con il contesto Europeo, le linee di intervento future in ambito LFR

Gli outcomes del workshop sono riportati nel report RdS/PAR2013/051 e tutte le lecture raccolte in distribuzione libera sul sito: http://192.107.65.184/ADP2013/Home_Frame.php

Inoltre dal 17 al 19 luglio 2014, presso ENEA del Centro Ricerche Brasimone, si è tenuto il workshop internazionale dal titolo: "FALCON general workshop: Towards the DEMO-LFR ALFRED" organizzato da ENEA in collaborazione con ANSALDO Nucleare (ANN) e l'Istituto rumeno per la Ricerca Nucleare Piteşti (ICN).

Il consorzio internazionale FALCON (Fostering ALfred CONstruction) è stato istituito lo scorso 18 Dicembre 2013 a Bucarest da ENEA, ANN e ICN con l'obiettivo di supportare lo sviluppo, il progetto e la realizzazione in Romania di ALFRED (Advanced Lead Fast REactor Demonstrator). ALFRED è il primo progetto di reattore interamente concepito e gestito da una comunità pan-europea di ricercatori, e destinato a diventare una delle Infrastrutture Strategiche di Ricerca: un parco tecnologico accessibile a tutti i ricercatori europei per studi ed applicazioni sulla tecnologia dei reattori veloci refrigerati a piombo.

Il Workshop di due giorni ha avuto come obiettivo principale quello di istituire un canale di dialogo tra le principali università italiane e rumene con il consorzio stesso per facilitare la definizione delle priorità di formazione e delle strategie comuni che consentano di far fronte alle future necessità di personale altamente qualificato.

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.

Fermo restando che il lavoro dei soggetti esterni è già incluso nelle descrizioni delle task riportate nei capitoli precedenti, in quanto integrato nell'insieme delle attività, in questa sezione si indicano le task e le specifiche tematiche in cui i soggetti esterni sono stati coinvolti e si evidenzia lo specifico contributo. Per ciascuno di questi soggetti viene fornita una sintesi delle attività ad essi affidate e dei relativi risultati ottenuti.

CIRTEN Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare

L'impegno del Consorzio CIRTEN per lo sviluppo del programma di ricerca concordato e coordinato con quello dell'ENEA, comprende l'attività svolta presso le seguenti Università consorziate: Politecnici di Milano e Torino, Università di Bologna, Palermo, Pisa e Roma "Sapienza".

LINEA PROGETTUALE 1. Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

a.3 Validazione di codici incidentali e modelli fenomenologici per simulazione di transitori su reattore PWR da 900 MWe e per confronto con dati disponibili da prove sperimentali

Le attività con contributo CIRTEN, eseguite presso le Università di Bologna e Pisa, sono programmate nella tematica: "Verifica dei progressi e dell'affidabilità dei codici ASTEC e MECOR attraverso il confronto dei risultati di calcolo riferiti ad una sequenza incidentale significativa per reattori PWR da 900 MWe" .

L'attività è stata finalizzata alla verifica dei progressi e dell'affidabilità di codici di calcolo attualmente impiegati nell'analisi di incidenti severi, relativamente agli aspetti di termoidraulica del circuito primario e degradazione in-vessel del nocciolo, attraverso il confronto dei risultati di calcoli per una sequenza incidentale severa rappresentativa. A tale scopo, sono stati impiegati i codici di calcolo integrali ASTEC (Università di Bologna) e MELCOR (Università di Pisa).

Il reattore di riferimento è il PWR di 900 MWe di tipo TMI-2, già oggetto di verifiche nell'ambito di benchmark internazionali promossi dall'OECD/NEA/CSNI, e la sequenza incidentale studiata è uno Small Break LOCA con mancata attuazione dei sistemi di raffreddamento di emergenza.

a.4 Metodi per Verifiche di Sostenibilità

Il contributo CIRTEN (Università di Pisa), sono programmate nella tematica *"*Contributo alla piattaforma IGD-TP e altre iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi".

Nell'ambito degli organismi di settore (IAEA, OECD-NEA, EURATOM, ecc.) è proseguita la partecipazione a iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi, in particolare a IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technological Platform) e a OECD-NEA-RWMC (Radioactive Waste Management Committee).

b.1 Sviluppo di una Metodologia per Valutazioni di Sicurezza in Condizioni Incidentali o di Pre-Emergenza

Le attività con contributo CIRTEN, sono programmate nelle tematiche:

1. Raccolta di coefficienti e parametri integrali per il calcolo rapido di termini sorgente a partire da inventari di nocciolo per LWR (Università di Bologna). L'attività è la naturale prosecuzione di quella svolta nelle due precedenti annualità (inventari di nocciolo per le centrali frontaliere) con la finalità di stimare rapidamente i possibili rilasci in atmosfera di eventuali incidenti nucleari agli impianti che distano meno di 200 km dal confine nazionale.
2. Studio integrale di sequenze BDBA su reattori del tipo PWR da 900 MWe (Università di Roma "Sapienza" e Palermo). Nella prima annualità è stato a punto di un modello MELCOR di un tipico impianto nucleare PWR da 900 MWe la cui bontà è stata testata nei confronti di un transitorio di SBO. Nell'ambito della seconda annualità tale modello è stato testato nei confronti di altri transitori che possono evolvere in incidenti severi. Si è proceduto inoltre alla individuazione degli indicatori critici per la esatta simulazione dei processi dispersivi di materiale radioattivo rilasciato a breve e medio raggio (fino a 500 km) e alla loro valutazione preliminare.
3. Per quanto concerne la verifica di fattibilità di una catena di calcolo "fast-running" e studi di "Sensitivity &Uncertainty" con l'uso del codice DAKOTA, la quantificazione dell'incertezza dei calcoli è uno dei requisiti fondamentali della catena di calcolo per la gestione degli incidenti nucleari. La credibilità di ogni simulazione numerica è infatti strettamente legata alle attività di Verification & Validation (V&V) e di quantificazione dell'incertezze (UQ). Inoltre, opportune analisi di sensitività (SU) possono condurre, mediante l'individuazione di punti di biforcazione, all'identificazione di ulteriori scenari incidentali. Pertanto, lo scopo dell'attività svolta (Università di Roma "Sapienza") è stato quello di investigare le capacità del tool DAKOTA, sviluppato dai Sandia National Laboratories (USA), nell'effettuare UQ ed SU, anche sfruttando le capacità di calcolo parallelo attualmente disponibili in ENEA.

b.2 Applicazione di Metodologia PSA e DSA del tipo "Risk-Informed" per la stima del rischio di eventi esterni

L'incidente di Fukushima ha messo in evidenza alcune lacune nell'ambito degli studi finalizzati alla analisi di rischio degli impianti nucleari, come la analisi della combinazione degli eventi esterni come eventi iniziatori, la valutazione del rischio relativa a siti con molte unità, l'esame di scenari incidentali che comportano la prestazione dei sistemi di sicurezza, ad esempio per lo smaltimento del calore residuo, per periodi di tempo prolungati. Le attività CIRTEN, svolte presso l'Università di Pisa, hanno riguardato l'identificazione ed analisi degli specifici aspetti concernenti l'analisi probabilistica di sicurezza, come evidenziati dall'incidente di Fukushima, e calcoli deterministici per valutare la risposta degli impianti relativamente alla funzione di contenimento e dei "tempi chiave"a fronte di situazioni come l'evento incidentale di Station BlackOut.

b.3 Calcolo e valutazione della sequenza incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima Dai-ichi. Identificazione delle principali criticità per l'avvio di azioni di "Accident Management" con riferimento alle centrali prossime ai confini nazionali

Le attività con contributo CIRTEN (Università di Roma "Sapienza") sono relative all'analisi "best estimate" con RELAP5 della sequenza incidentale nell'unità 1 della centrale di Fukushima Dai-ichi. L'Unità 1 avendo perso immediatamente i sistemi di refrigerazione del core e del sistema di contenimento, ha subito un esteso danneggiamento che, secondo stime di diverse organizzazioni internazionali, ha comportato la fusione e rilocazione di buona parte del combustibile nucleare. Lo scopo dell'attività è quello di simulare con il codice "best-estimate" RELAP5, accoppiato con il codice per gli incidenti severi SCDAP, l'evoluzione di tale incidente.

Lo studio svolto ha incluso inoltre una serie di analisi di sensitività delle operazioni eseguite/eseguibili dal personale, in modo da dimostrare le potenzialità del tool di simulazione nell'identificare i possibili scenari di gestione dell'incidente.

c.1 Studi relativi alla simulazione integrale di sistema presso gli impianti SIET

Le attività con contributo CIRTEN (Università di Palermo) sono relative alla validazione e verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul programma sperimentale SPES2.

Nella presente annualità proseguono le attività di V&V dei codici termo-idraulici di sistema per lo studio di fenomenologie rilevanti per il progetto della sicurezza nei sistemi innovativi, in genere dotati di sistemi di sicurezza di tipo passivo. Tali sistemi, anche alla luce dell'evento di Fukushima, rivestono un ruolo di forte interesse internazionale. L'attività ha riguardato in particolare la validazione dei codici di calcolo TRACE e CATHARE2. Nello studio si utilizzano dati ottenuti da prove sperimentali condotte nel passato, quindi già disponibili, sulla facility SPES2.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Nell'ambito delle attività di modellazione di uno Spool Piece (SP) per la stima dei parametri caratteristici dei deflussi bifase, il CIRTEN (Politecnico di Torino) in collaborazione con SIET, ha sviluppato un modello empirico della sonda che permetta di ricavare in maniera univoca e con incertezza nota il grado di vuoto e la distribuzioni delle fasi nel condotto in cui viene posta. Un'ulteriore campagna sperimentale, riguardante lo SP composto da venturi e sonda capacitiva, è stata effettuata al fine di caratterizzare il comportamento degli strumenti in deflusso orizzontale e confrontare i risultati sia con quelli ottenuti da SIET con la sonda "a caldo" sia con quelli ottenuti con lo SP in configurazione verticale.

Inoltre CIRTEN (Politecnico di Milano e di Torino hanno svolto un'analisi comparata delle prestazioni di scambiatori di calore/generatori di vapore compatti per la rimozione della potenza in modo passivo. Per i requisiti di sicurezza e sostenibilità dei reattori innovativi di IV generazione è, infatti, di grande interesse lo sviluppo di sistemi per la rimozione del calore di tipo compatto e passivo (convenzione naturale) che svolgano correttamente la loro funzione sia in condizioni di normale esercizio che in condizioni incidentali. Sulla linea degli studi effettuati negli anni scorsi sui generatori dig a tubi elicoidali vengono presi in esame scambiatori di calore/generatori di vapore di diversa tipologia effettuando un analisi ed un confronto delle loro potenzialità in termini di rimozione di potenza in modo passivo.

LINEA PROGETTUALE 2: Collaborazione internazionale per il nucleare di iv generazione

a.1 Progettazione di sistema

Relativamente agli studi di sostenibilità sui sistemi LFR e SMR-LFR di IV generazione, presso l'Università di Roma sono state analizzate diverse strategie nei processi di separazione e di trasmutazione degli attinidi per ottenere la chiusura del ciclo del combustibile, attraverso l'utilizzo ottimale delle risorse naturali e la minimizzazione dei rifiuti radioattivi da disporre nel deposito geologico.

In particolare sono state valutate le differenze in termini tecnici ed economici tra l'impiego di soli LFR e di LFR abbinati a sistemi sottocritici tipo ADS per l'implementazione del ciclo chiuso del combustibile attraverso il riprocessamento e riutilizzo dei transuranici (TRU) detto "Partitioning & Transmutation" ,

Presso il Politecnico di Milano sono state inoltre analizzate, in via preliminare, configurazioni del nucleo del reattore che soddisfano criteri di maggiore sicurezza contro la proliferazione. Si sono effettuate simulazioni neutroniche volte a valutare la efficacia delle diverse strategie di gestione del combustibile, confrontandole in termini di sostenibilità ambientale, livello della sicurezza ed efficienza del sistema.

a.2 Progettazione nocciolo LFR

L'Università di Roma "Sapienza" con ENEA ha provveduto alla progettazione di una facility per misure di trasporto neutronico in Piombo nel reattore TAPIRO, articolando il lavoro su tre linee:

1. validazione del modello Monte Carlo di TAPIRO nel vano colonna termica;
2. previsione delle caratteristiche del trasporto neutronico in Piombo nel vano colonna termica mediante il modello Monte Carlo di TAPIRO;
3. studio di rappresentatività della facility di trasporto in Piombo rispetto ai parametri dei reattori di riferimento mediante l'uso del codice ERANOS e della Teoria Generalizzata delle Perturbazioni.

Relativamente alla validazione della metodologia di calcolo perturbativo GPT implementata nel codice ERANOS attraverso il confronto con i risultati ottenuti con metodi diretti, presso l'Università di Roma "Sapienza" è stata iniziata un'attività avente come scopo la validazione e integrazione di una procedura di calcolo già esistente

(modulo MECCYCO) per calcoli perturbativi lineari nel campo dei nuclidi e, successivamente, la implementazione delle procedure di calcolo per calcoli perturbativi nel campo non-lineare neutroni/nuclidi.

Relativamente alla progettazione del nocciolo del DEMO LFR, l'Università di Bologna ha supportato ENEA nel lavoro di individuazione e analisi di possibili soluzioni alle criticità dell'attuale progetto di nocciolo, così come evidenziate da una preliminare revisione critica del progetto stesso, per compilare una lista di opzioni e raccomandazioni che servano all'impostazione di una nuova fase di progettazione del nocciolo di tale reattore.

Relativamente agli studi preliminari di tecniche di monitoraggio del nocciolo di ALFRED, presso l'Università di Pisa il lavoro è stato articolato su due filoni, tecnicamente indipendenti pur afferendo, concettualmente, alla medesima famiglia delle tecniche di monitoraggio di nocciolo. Il primo studio è stato volto alla valutazione della possibilità di inserire rivelatori neutronici all'interno del vessel di ALFRED, in prossimità del nocciolo, mentre il secondo studio è stato invece rivolto all'adattamento ed all'applicazione di una tecnica di individuazione dell'elemento cui appartiene una barretta su cui si sia verificata una rottura della guaina, con conseguente rilascio nel circuito primario del suo inventario di radioattività.

a.3 Analisi di sicurezza

Relativamente alla definizione di strumentazione per la misura di flussi neutronici in reattori veloci LFR, il lavoro svolto in collaborazione con l'Università di Roma "Sapienza" ha avuto come obiettivo lo studio dell'applicazione della strumentazione neutronica commercialmente disponibile ai reattori LFR, proponendo miglioramenti e soluzioni innovative al fine di ottimizzare l'efficacia e l'adeguatezza del sistema di strumentazione, monitoraggio e controllo di reattore.

Relativamente alle azioni di sviluppo ed estensione del codice di fuel pin performance TRANSURANUS LFR-oriented, presso il Politecnico di Milano l'attività svolta ha riguardato una revisione critica dei principali modelli fenomenologici per il piombo e per gli acciai austenitici della classe 15-15Ti.

Relativamente all'analisi numerica di scenari operativi e incidentali, con la collaborazione dell'Università di Roma è stata completata la nodalizzazione dell'impianto EBR-II iniziata nel PAR-2012. Questa consiste in un modello termoidraulico tridimensionale con codice di sistema RELAP5-3D© del reattore di ricerca EBR-II refrigerato a sodio. Sulla base dei dati disponibili e delle condizioni iniziali, fornite nelle specifiche del Benchmark sull'EBR-II, sono state verificate le condizioni di stazionario ed è stata realizzata la simulazione blind del transitorio SHRT-17, confrontando i risultati con i dati sperimentali. I risultati blind sono stati presentati al secondo meeting dell'IAEA CRP sull'EBR-II. A fronte dei dati sperimentali è stata poi effettuata l'analisi post-test.

Nell'ambito dell'analisi di sicurezza dei sistemi LFR, presso L'Università di Pisa è stato studiato il fenomeno della "core compaction" che rappresenta uno degli eventi base di progetto. Tale fenomeno è ad oggi poco noto, in base a quanto evidenziato dall'analisi dello stato dell'arte e messo in luce nell'attività svolta nell'ambito del PAR 2012.

a.4 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione

Proseguendo le attività iniziate nei precedenti PAR, presso il Politecnico di Milano è proseguita la ricerca ed applicazione di metodi teorici e computazionali per la stima di grandezze termodinamiche non note ma necessarie per effettuare una prima valutazione della composizione del sistema combustibile-refrigerante all'equilibrio termodinamico mediante un codice basato sulla minimizzazione dell'energia libera di Gibbs. A tale scopo sono stati utilizzati due diversi approcci: quello basato sui metodi semi-empirici è risultato di più diretta applicazione, mentre quello basato sul metodo DFT (Density Functional Theory) ha consentito di ottenere risultati, finora, solo in fase gas.

b.1 Qualifica, modellazione e analisi di coating e materiali strutturali per sistemi LFR

Per studiare il deterioramento della funzionalità dei rivestimenti per deplezione dell'elemento passivante, presso CIRTEN sono state eseguite prove di ossidazione isoterma in aria alla temperatura di 630 °C, dei campioni FeCrAl depositati su P91 per pack cementation. Al termine di ciascun trattamento sono stati misurati i profili di concentrazione delle specie coinvolte, lo spessore dello strato in cui si è avuta diffusione di alluminio nel substrato, ed in particolare la concentrazione superficiale di alluminio per verificare che si sia mantenuta al di sopra della soglia critica al di sotto della quale non si forma lo strato passivante protettivo.

Presso il Politecnico di Milano si è inoltre studiata la deposizione di multistrati costituiti da un top layer di allumina amorfa deposta per PLD ed uno strato di buffer o bonding layer di composizione FeCrAlY in contatto col substrato prodotto per RF Sputtering (sputtering a radiofrequenza). In particolare, al fine di verificare la fattibilità di queste

deposizioni sulle barre di combustibile, le attività di sintesi si sono focalizzate sulla messa a punto di un protocollo per la deposizione su provini cilindrici.

ENEA e Politecnico di Milano, per simulare la stabilità microstrutturale e dimensionale sotto irraggiamento neutronico dei materiali prodotti, hanno avviato delle campagne di irraggiamento con ioni pesanti. Le attività svolte hanno riguardato la caratterizzazione dei materiali irraggiati la scorsa annualità e la progettazione di nuove prove di irraggiamento. Sono stati caratterizzati i campioni di allumina prodotti tramite PLD su substrati di acciaio austenitico 15-15 Ti irraggiati con ioni pesanti durante la campagna di irraggiamenti portata avanti presso la piattaforma sperimentale JANNUS dei centri di ricerca CEA di Saclay (SRMP) e di Orsay (CSNSM).

In maniera trasversale alle linee di attività di cui sopra si sono poi realizzate presso CIRTEN prove di caratterizzazione completa dei campioni che sono nel dettaglio:

- Microdurezza Vickers Nanoindentazione
- Prove di Scratch
- Analisi per diffrazione di raggi X
- Caratterizzazione al microscopio elettronico a scansione
- Analisi della composizione chimica per spettrometria a dispersione di energia.

c.1 Sperimentazione e modellistica per la termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, l'Università di Pisa ha supportato ENEA nella progettazione di 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.

Per quanto riguarda l'accoppiamento fra codici di sistema e codici CFD, come pianificato è stata svolta dall'Università di Pisa (GRNSPG) un'attività volta alla qualifica e al miglioramento del *tool* di accoppiamento precedentemente sviluppato nell'ambito dei PAR 2011 e 2012. L'attività svolta è stata incentrata essenzialmente sulla simulazione, ai fini della validazione, di un esperimento che offrisse, oltre ai dati necessari per il confronto, anche un interesse pratico in relazione alla tecnologia dei refrigeranti. A tale scopo si è fatto riferimento ad uno degli esperimenti che sono stati condotti in passato sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (ENEA Brasimone) nell'ambito di una campagna di studi sulla circolazione naturale e/o assistita di una lega eutettica Piombo-Bismuto in un loop chiuso .

Inoltre, la metodologia di calcolo accoppiata tra codici di sistema - codici CFD (in particolare tra RELAP5 e Ansys Fluent) sviluppata nell'ambito del PAR2012 dall'Università di Pisa, è stata utilizzata per la simulazione di un test sperimentale in circolazione naturale (TEST 301) eseguito sull'apparecchiatura sperimentale NACIE (Natural Circulation Experiment) situata presso il Centro di Ricerca Brasimone. Successivamente la metodologia di calcolo implementata e validata per mezzo di confronto con dati sperimentali è stata ulteriormente sviluppata in modo tale da migliorare la stabilità del calcolo e contemporaneamente ridurre il tempo del calcolo stesso.

Relativamente allo sviluppo del codice FEM-LCORE, il lavoro prodotto dall'Università di Bologna illustra i progressi compiuti nell'integrazione del codice di calcolo FEM-LCORE nella piattaforma SALOME. SALOME è un tool open-source sviluppato nell'ambito di diversi progetti europei (NURESIM, NURISP, NURESAFE) che mette a disposizione diversi moduli per la generazione di mesh, analisi di risultati e gestione di simulazioni numeriche, in particolare mettendo in comunicazione codici differenti con un'interfaccia unificata. L'attività ha riguardato l'installazione, il test e lo sviluppo all'interno della piattaforma di un nuovo modulo che permetta la comunicazione tra il codice FEM-LCORE e SALOME. In questa maniera sarà quindi possibile interfacciare il codice con tutti gli altri codici che sono già stati interfacciati con la piattaforma, in particolare i codici di sistema come CATHARE.

Infine, presso il Politecnico di Torino per quanto concerne il codice FRENETIC si è provveduto alla validazione del codice termoidraulico, mediante code-to-code benchmark utilizzando i dati sperimentali disponibile dal reattore veloce a sodio EBR-II. Relativamente al moduli di neutronica, il calcolo del flusso aggiunto è stato implementato nel modulo NE, migliorando il calcolo dei parametri cinetici. Il modulo è stato poi verificato adottando test-case standard per calcoli neutronici.

SIET SpA

Le attività affidate alla SIET SpA nell'ambito del PAR 2013 sono relative alla sola linea progettuale LP1 - Obiettivo c.

c.1 Studi relativi alla simulazione integrale di sistema presso gli impianti SIET

SIET ha condotto uno studio di fattibilità di una nuova configurazione della facility SPES3 che prevede l'utilizzo combinato di componenti esistenti delle facility SPES-2 e SPES-3. L'utilizzo di componenti preesistenti (canale di

potenza e pompe dell'impianto SPES2) richiede delle modifiche al design originale di SPES3 la cui fattibilità è stata valutata SIET, in quanto progettista dell'impianto, quest'ultima ha inoltre effettuato una stima preliminare dei costi e dei tempi di realizzazione necessarie per queste modifiche.

Nell'ambito di questo sotto-obiettivo SIET ha condotto uno studio di fattibilità, integrato da valutazioni relative a tempi e costi, per la sperimentazione di un sistema di rimozione passiva del calore di decadimento nei reattori refrigerati a piombo basato sul fenomeno della condensazione del vapore all'interno dei tubi di uno scambiatore immerso in una piscina di acqua fredda. In tale ambito, una delle maggiori problematiche da affrontare è la regolazione delle prestazioni dello scambiatore per impedire che, in determinate condizioni di esercizio, il metallo liquido venga eccessivamente raffreddato con rischio di solidificazione. La riduzione della potenza termica rimossa per degrado del coefficiente di scambio termico nei tubi tramite iniezione di incondensabile è una delle soluzioni attualmente in sviluppo, che però necessita di conferma sperimentale.

c.2 Sperimentazione su componenti critici e strumentazione prototipica per reattori innovativi

Nel corso del PAR2012 erano state provate in SIET due diverse configurazioni di spool piece per la misura della portata massica bifase. Entrambe le configurazioni, basate sulla sonda capacitiva sviluppata da SIET, hanno presentato dei problemi, in particolare nella messa a punto di un modello teorico per l'interpretazione dei segnali elettrici. Nel corso della presente annualità SIET ha condotto un'analisi approfondita dei dati acquisiti nelle campagne sperimentali effettuate e delle problematiche emerse, definendo i limiti di utilizzo dello spool piece, stimando chiaramente le incertezze sulla misura di portata massica e traendo indicazione per un'eventuale ottimizzazione della sonda che permetta una riduzione delle incertezze e/o un ampliamento della zona di impiego.

FN SpA

In continuità con quanto realizzato nel precedente Piano Annuale di Realizzazione, FN ha proceduto con gli studi di fabbricazione relativi a componenti prototipici del sistema primario di un sistema LFR progettati da ENEA. Partendo dalla valutazione di alcuni parametri critici individuati in precedenza, il contributo FN ha riguardato la revisione della configurazione della griglia spaziatrice dell'elemento di combustibile del sistema LFR, fino a giungere alla realizzazione della progettazione esecutiva.

Sono stati valutati i limiti tecnologici delle tecniche di lavorazione prese in esame. In particolare ci si è soffermati sulle problematiche relative alla piegatura di acciai inox austenitici anche incruditi, sono state approfondite le caratteristiche dei processi presi in considerazione (foto tranciatura chimica, piegatura, stampaggio), anche mediante analisi sperimentali. Sono stati quindi realizzati i disegni esecutivi della configurazione di griglia revisionata, sulla base dei quali poter procedere alla realizzazione degli stampi appositi.

E' stata effettuata infine una ricerca di mercato per individuare ditte specializzate nella foto tranciatura chimica e nelle altre tecniche individuate.

Attività di fisica della fusione complementari a ITER

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata da tutti i paesi più industrializzati un'opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma di ciò, Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi in un 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. Per sfruttare al meglio la sperimentazione di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno deciso di avviare in parallelo un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare ad ITER.

Il Broader Approach è un accordo di cooperazione internazionale tra Unione Europea (EURATOM) e Giappone avente lo scopo di integrare il progetto ITER ed accelerare i tempi per la realizzazione dell'energia da fusione, attraverso attività di R&S relative a tecnologie avanzate per i futuri reattori dimostrativi. L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono realizzazioni prototipiche di alto contenuto tecnologico.

Il programma Broader Approach rappresenta un'opportunità molto importante per sviluppare ricerche di base sulla fisica e la tecnologia della fusione nucleare. Infatti, il BA include una serie di attività finalizzate: alla realizzazione di componenti ad alto contenuto tecnologico; allo sviluppo di conoscenze di fisica di interesse per il reattore a fusione DEMO; alla realizzazione di prototipi per la validazione del progetto della sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) e alla realizzazione di un centro di studi denominato IFERC (International Fusion Energy Research Center) indirizzato a ricerche sui materiali e al supercalcolo.

In particolare le attività del BA includono:

- la costruzione di una macchina Tokamak denominata JT-60SA: macchina superconduttrice delle dimensioni del JET destinata a studiare scenari operativi rilevanti per DEMO;
- la realizzazione di una facility in cui saranno provati i componenti di IFMIF, complessa struttura di ricerca finalizzata allo studio del danneggiamento dei materiali provocato dal flusso di neutroni di alta energia, quali quelli generati nella reazione di fusione. Si tratta del prototipo del primo stadio dell'acceleratore di ioni di deuterio che dopo essere accelerati fino ad energie di 40 MeV vanno a collidere un bersaglio di litio producendo un flusso di neutroni molto intenso capace di produrre un danneggiamento di 80 dp/anno;
- la realizzazione di un prototipo del bersaglio per la produzione di neutroni (target) di IFMIF su cui far scorrere a forte velocità il litio liquido e i dispositivi per la sua manutenzione remota;
- la creazione del International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include attività per DEMO tra le quali lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC e un centro di supercalcolo.

L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, ed in particolare ad ENEA sono state affidate le seguenti attività:

- Realizzazione, in collaborazione col CEA francese, del magnete superconduttore di JT-60SA, con la realizzazione di nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.
- Ricerca e sviluppo per IFMIF-EVEDA e IFERC che richiedono lo sviluppo di 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).

Altre attività di ricerca sono svolte nell'ambito del programma FAST, il nuovo esperimento satellite europeo, finalizzato alla realizzazione di un esperimento di fusione di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Costruzione Tokamak JT-60SA

ENEA è impegnata, in collaborazione con il CEA francese, nella realizzazione del magnete superconduttore di JT-60SA, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche. JT-60SA si propone di contribuire al rapido sviluppo dell'energia da fusione attraverso lo studio degli aspetti più importanti della fisica di ITER e DEMO.

JT-60SA è un Tokamak superconduttore, raffreddato da elio supercritico alla temperatura di 4,4 K e termicamente isolato da un criostato, che sarà installato a Naka nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U. L'ENEA è responsabile della realizzazione e fornitura di 9 delle 18 bobine toroidali del magnete del Tokamak e di parte degli alimentatori di alta tensione e corrente del sistema elettrico. La realizzazione delle bobine viene eseguita utilizzando la linea di avvolgimento installata nello stabilimento della ASG dove avviene la relativa impregnazione, inserimento e chiusura finale nella cassa di contenimento.

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). Per condurre ricerche appropriate in questi campi, nel Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione della facility di ricerca IFMIF. Componenti principali della facility saranno:

1. una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio);
2. due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target);
3. un target costituito da litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità, su cui gli ioni di deuterio accelerati impattano, sviluppando neutroni di elevata energia mediante opportune reazioni nucleari.

L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni ad alta energia, alle relative attività di manutenzione remotizzata, allo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione dei metalli in presenza di litio e alla validazione dei sistemi di purificazione per il litio.

Lo studio di compositi ceramici è una delle attività di ricerca e sviluppo di DEMO previste nell'ambito del progetto IFERC (International Fusion Energy Research Center). 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. Le attività ENEA, svolte in collaborazione con FN SpA, riguardano lo studio di compositi in SiC/SiC.

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, UK) e quelle di ITER (la macchina tokamak che sarà costruita a Cadarache, F.). FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. All'interno dello sviluppo del progetto concettuale di FAST verranno 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 quattro obiettivi intermedi, corrispondenti alle linee di ricerca citate in precedenza, più un obiettivo specifico relativo ad attività di diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Macchina JT-60SA

L'obiettivo prevede la realizzazione completa di due avvolgimenti della bobina toroidale incluse le relative prove di accettazione e la realizzazione di tre doppi pancake. Lo sviluppo degli avvolgimenti delle bobine toroidali è accompagnato dalla realizzazione dei componenti meccanici ricavati da lamiere per la composizione delle casse di contenimento. Nell'ambito delle attività per le alimentazioni elettriche, si prevedeva di eseguire le prove di accettazione del prototipo della Switching Network Unit (SNU), realizzata nel PAR 2012, e dedicata alla

commutazione rapida della corrente continua delle bobine del solenoide centrale. Si prevedeva inoltre di realizzare tre sistemi di interruzione statico (static circuit breaker, SCB) delle ulteriori 3 SNU previste dalla fornitura. In aggiunta era pianificato lo sviluppo dei disegni di fabbrica e di layout, disegni meccanici ed elettrici dei sistemi di alimentazione di potenza. Infine si prevedeva di realizzare i trasformatori associati ai convertitori per Fast Plasma Position Control (FPPC) completi di prove finali di accettazione, mentre il prototipo dei convertitori in oggetto era previsto in un avanzato stadio di allestimento.

La realizzazione della macchina tokamak JT-60SA vede l'impegno di professionalità interne ad ENEA e collaborazioni industriali con la stipula di contratti di fornitura con aziende specializzate.

a.1 Fornitura di 9 moduli di magnete di campo toroidale

Realizzazione WP impregnati

Le bobine del sistema magnetico toroidale di JT-60SA sono costituite dalla sovrapposizione di 6 doppi pancake (DP), per un totale di 72 spire di cavo superconduttore in NbTi. Il peso complessivo della bobina al termine dell'impregnazione è di circa 6,3 t, l'ingombro massimo circa 7,5 m x 4,4 m. La fabbricazione prevede l'esecuzione di tre passi fondamentali: *i)* avvolgimento del conduttore sulla forma a D per formare il doppio pancake; *ii)* impilaggio dei doppi pancake e nastratura contromassa; *iii)* impregnazione e prove di accettazione finali.

La realizzazione dei DP avviene attraverso l'uso di una linea di avvolgimento, appositamente progettata e collaudata nel corso delle attività del PAR 2012 con la realizzazione di un mock-up a piena scala. I primi sei DP della prima bobina sono stati realizzati entro il 2013 con un ritmo di un DP ogni tre settimane. Una volta avvolti sulla forma di avvolgimento dotata di strette tolleranze di forma e planarità, e che è sincronizzata con tutti gli altri organismi della linea, i DP vengono spostati su un banco di nastratura costituito da tredici supporti regolabili con i quali è, eventualmente possibile correggere le deviazioni dimensionali. Lo spostamento viene effettuato con una struttura di sollevamento tanto rigida da non indurre cambi di forma al DP durante la movimentazione. Relativamente alla precisione di avvolgimento è opportuno sottolineare che l'avvolgimento comincia dalla mezzeria del conduttore. Ciò permette di avvolgere le spire interne del DP con la precisione con cui è dotata la forma di avvolgimento a cui le spire vengono fatte accostare nel processo fabbricativo. Questa caratteristica è fondamentale per le prestazioni della bobina, in cui la superficie interna, affacciandosi al plasma deve essere il più possibile prossima alle condizioni nominali per assicurare la corretta distribuzione di campo magnetico. Nello specifico l'avvolgimento inizia con la formazione di una riserva, avvolta all'interno della tavola di avvolgimento, con cui verrà realizzato il secondo strato di DP. Seguono: la formatura del salto strato e la realizzazione dell'ingresso di elio. Quest'ultimo, rappresentando uno dei potenziali punti deboli della bobina viene sottoposto a dei rigorosi test di accettazione prima che l'avvolgimento possa procedere.

La Figura 296 riporta una vista dello stabilimento ASG di Genova dove è installata la linea di avvolgimento e la fase di impilaggio del secondo DP della prima bobina. Nella Figura 296a si riconoscono in basso il banco di impilaggio con tre doppi pancake impilati, al centro uno dei due banchi dedicati alla formatura delle uscite elettriche e all'isolamento contromassa di DP ed infine sullo sfondo la linea di avvolgimento. Si noti la presenza sul banco di impilaggio delle ventisei spine verticali disposte nella posizione nominale che consentono di eseguire un perfetto allineamento dei diversi DP così come previsto dalle specifiche tecniche.

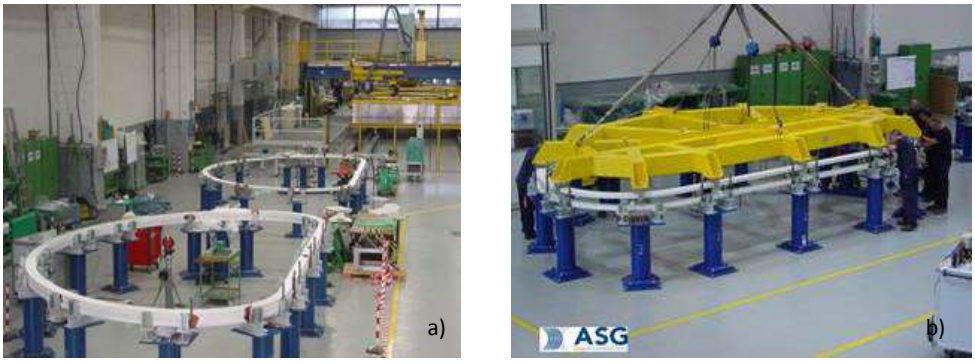


Figura 296. a) Stabilimento ASG, sullo sfondo la linea di avvolgimento b) Impilaggio del secondo DP della prima bobina

Le attività di avvolgimento si concludono con la nastratura contromassa dell'isolamento e il montaggio dei cinque giunti elettrici interni, per disporre elettricamente in serie i sei DP, e delle due terminazioni che rappresentano

l'interfaccia elettrica della bobina. L'isolamento contromassa è realizzato da 5 nastrature mezzo-sovrapposte di nastro di vetro di 0,25 mm di spessore e 50 mm di larghezza per un totale di 2,5 mm che si aggiungono ai 0,5 mm di isolamento realizzati sul singolo DP. Le terminazioni sono costituite da delle piastre di rame e acciaio che contengono il conduttore e permettono, tra l'altro, la fuoriuscita del flusso di elio che serve a raffreddare la bobina alla temperatura di 4,4 K necessaria al suo funzionamento nella fase superconduttiva. Giunto elettrico e terminazione sono stati oggetto di un'intensa attività di qualifica nel corso del 2013, in cui l'ENEA ha avuto un ruolo di primo piano.

La Figura 297 mostra i sei doppi pancake della prima bobina prima della nastratura finale e la fase di movimentazione con il telaio di sollevamento verso la stazione di impregnazione. Si riconosce al centro della Figura 297a il laser tracker impiegato per misurare la forma dell'avvolgimento e apportare le eventuali correzioni, nella Figura 297b sono invece riconoscibili i cinque giunti elettrici e le due terminazioni. Si può inoltre individuare la nastratura di vetro che ricopre la bobina, nonché lo strato di nastro distaccante utilizzato per consentire la successiva rimozione dell'eccesso di resina e del lamierino impiegato nel processo di impregnazione. Prima di procedere oltre è utile sottolineare come tutti i passaggi finora descritti nella manifattura della prima bobina siano stati arricchiti di completi rilievi dimensionali delle superfici interna ed esterna e, della linea media della gamba dritta nonché dei test elettrici mirati a riconoscere la presenza di eventuali corti circuiti elettrici.

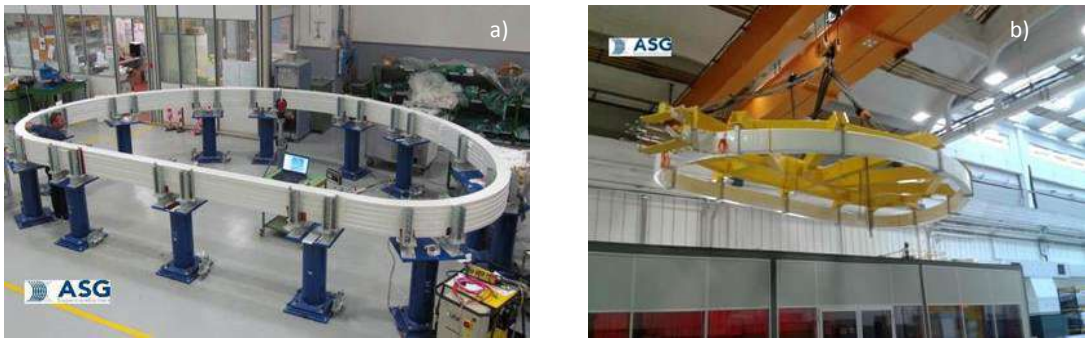


Figura 297. a) Prima bobina al termine delle operazioni di impilaggio dei 6 DP; b) Movimentazione prima bobina nella stazione di impregnazione

Relativamente al processo di impregnazione è opportuno sottolineare che questo viene eseguito rivestendo la bobina con un lamierino sottile saldato a formare una camera a tenuta da vuoto in cui è realizzato il grado di vuoto richiesto dalla fase di impregnazione. Attorno alla bobina vengono montate delle strutture che esercitano la necessaria pressione durante la fase di impregnazione e curing. La bobina è adagiata su un tavolo di elevata planarità in grado di ruotare rispetto ad un asse orizzontale per consentire l'ingresso della resina dal basso e la sua fuoriuscita sulla sommità dei giunti elettrici. Il processo noto come Vacuum Pressure Impregnation (VPI) è costantemente monitorato per evitare ogni inconveniente.

Il montaggio delle strutture di pressatura viene eseguito dietro misure continue con laser tracker della posizione e forma della bobina in modo da correggere eventuali deviazioni introdotte dall'ultima movimentazione. Una volta completata l'impregnazione ed il relativo ciclo di curing, la bobina viene estratta dalla stazione di impregnazione e portata in una stazione di pulizia con supporti sollevabili con pistoni pneumatici, nella quale, tra l'altro, viene eseguita la verniciatura con vernice conduttiva ed un rilievo dimensionale completo per permettere l'incollaggio delle dodici mire necessarie al corretto inserimento della bobina nella cassa, le lavorazioni di macchina finali della cassa e il successivo assemblaggio delle bobine presso il sito di Naka.

Infine, le bobine sono sottoposte ai test di accettazione finali della specifica che prevedono test dimensionali, di flusso e tenuta, e test elettrici. Tutti i test sono stati superati con successo confermando come il processo di realizzazione adottato assicuri un'elevata precisione di avvolgimento ed una grande qualità del manufatto. I valori ottenuti dal test di tenuta, dell'ordine di 10^{-10} mbar L/s sono addirittura tre ordini di grandezza inferiori rispetto al massimo ammissibile, mentre il test di flusso condotto al termine dell'impregnazione ha dato risultati coincidenti con quello svolto prima dell'impregnazione confermando l'assenza di penetrazioni di resina all'interno del cavo superconduttore. Questa eventualità è stata peraltro scongiurata mantenendo la bobina in leggera pressione di azoto durante l'impregnazione. Anche i test elettrici sono stati superati con successo ed hanno mostrato l'efficacia dell'isolamento nel resistere alla tensione di 3,8 kV previsti, mentre i test elettrici impulsivi interspira non hanno mostrato la presenza di alcun corto di spira o di strato. Infine il Paschen test a temperatura ambiente eseguito nella camera da vuoto anulare appositamente costruita ha dimostrato la tenuta dell'isolamento anche nelle zone

più critiche come i sei ingressi di Elio e le uscite elettriche. In Figura 298 sono mostrate rispettivamente la prima bobina al termine del test di tenuta a vuoto condotto nella camera da vuoto anulare a forma di D appositamente realizzata da ASG, e la zona delle terminazioni che è stata isolata con un isolamento temporaneo per poter eseguire i Paschen test. La camera da vuoto permette di raggiungere valori di vuoto dell'ordine di 10^{-6} mbar ed è dotata di finestre per l'osservazione visiva diretta di eventuali scariche nelle zone maggiormente critiche della bobina.

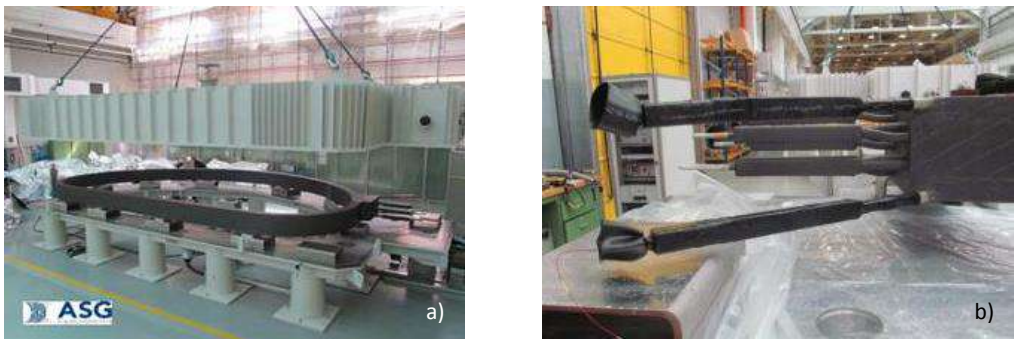


Figura 298. a) La prima bobina al termine della prova di tenuta in pressione; b) Zona delle terminazioni isolata per l'esecuzione dei Pasche test

Qualifica processi attività di integrazione

La fabbricazione dei nove moduli di magnete si completerà con l'inserimento delle bobine nelle relative casse di contenimento in acciaio AISI 316L. Per la validazione dei metodi realizzativi l'ASG ha completato tutte le attività di qualifica dei processi speciali coinvolti. In particolare è opportuno ricordare: il processo di inserimento della trave di impregnazione nei mock-up della cassa; la saldatura di quest'ultimi; il processo di impregnazione. A margine di questi processi di qualifica è necessario menzionare la conclusione della qualifica degli isolatori elettrici che verranno montati nel circuito dell'elio, in numero di tredici per bobina, e che è stata condotta in parte presso i laboratori dell'ENEA. Tale attività ha riguardato un test di tenuta in pressione alla temperatura dell'azoto liquido e un test di pressione ciclico a 120 bar con argon.

Una volta completato l'inserimento si sono eseguite sia la saldatura trasversale da 47 mm, che unisce gamba dritta e curva, sia la saldatura dei coperchi di chiusura da 20 mm. Tutte le saldature sono state qualificate e certificate dall'Istituto Superiore di Saldatura così come previsto in specifica. A questo scopo le saldature sono state effettuate nelle stesse condizioni che verranno adottate durante la fabbricazione dei moduli. La Figura 299 mostra l'interno del mock-up per la saldatura trasversale opportunamente strumentato con termocoppie e lo stesso al termine della saldature dei coperchi con all'interno al trave di impregnazione.

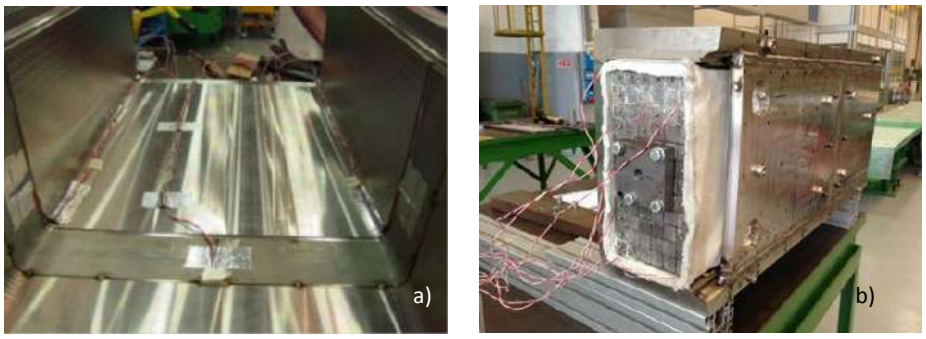


Figura 299. a) Mock-up per saldatura trasversale strumentato con termocoppie; b) Mock-up di saldatura al termine della saldatura

La presenza delle termocoppie ha consentito di verificare che la temperatura massima raggiunta nel processo è sempre al di sotto del limite di 100 °C indicato per non danneggiare l'isolamento di contromassa. La misura della deformazione dei mock-up al termine di ogni passo di saldatura ha consentito di stimare la quantità di extra materiale da considerare sulle casse per tener conto dei ritiri e ha permesso di definire la corretta sequenza necessaria a limitare le distorsioni.

Collaudo attrezzature fase di integrazione

Tutte le attrezzature per la fabbricazione e trasporto delle nove bobine sono state acquisite. Nel corso del 2014 sono state collaudate presso gli stabilimenti ASG di Genova le ultime attrezzature previste. Si tratta dell'attrezzatura di inserimento della bobina nella cassa e dell'attrezzatura di embedding (Figura 300).



Figura 300. Attrezzatura per inserimento della bobina nella cassa (a) e quella di embedding (b)

L'attrezzatura di inserimento della bobina è costituita di un nucleo centrale in grado di ruotare rispetto ad un asse orizzontale, ai cui lati sono montati su rotaie due carrelli che consentono l'avvicinamento delle due gambe alla bobina. Il macchinario è dotato di regolazioni fini che permettono aggiustamenti millimetrici così come necessario visti i ridotti spazi previsti a progetto per l'inserimento nella cassa. L'attrezzatura di embedding consta invece di un tavolo in grado di inclinarsi per favorire il flusso della resina dal basso e di una struttura di isolamento verso l'esterno per il riscaldamento previsto nel ciclo di impregnazione. Come già anticipato, questa attrezzatura è stata già collaudata con la trave di embedding.

Ulteriori dettagli su queste attività sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/200.

a.2 Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Nell'ambito del PAR 2012 sono stati completati i primi 3 set di componenti meccanici per la composizione della cassa che comprendono anche i gomiti realizzati in materiale forgiato.

Ciascuna cassa a forma di D è composta da un numero limitato di componenti per minimizzare le saldature necessarie alla chiusura finale dell'avvolgimento della bobina all'interno della cassa di contenimento. La cassa è costituita principalmente da una gamba dritta, da una gamba curva e da coperchi per il contenimento della bobina. La gamba dritta, a sua volta, è costituita da una parte centrale in materiale laminato e da due elementi a forma di gomito saldati alle sue estremità realizzati con materiale forgiato.

Dopo le lavorazioni dei componenti, è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla Walter Tosto (WT), ancorché rispondente alle specifiche di acquisto, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

L'integrità strutturale delle casse di contenimento della bobina toroidale è essenziale per il corretto funzionamento del Tokamak JT-60SA, pertanto "Fusion for Energy" (F4E) si è impegnata a fornire, a sue spese nuovo materiale forgiato, con consegne mensili a partire dal 16 Maggio 2014 e completando la fornitura entro la fine del 2015.

In attesa della fornitura da parte di F4E del nuovo materiale forgiato, le attività realizzative della WT sono state modificate prevedendo il completamento dei componenti ricavati da laminati necessari alla composizione di 15 casse e due gomiti nel nuovo materiale forgiato. In particolare i componenti realizzati sono di seguito elencati:

- Componenti ricavati da laminati per la composizione di 15 gambe dritte;
- Componenti ricavati da laminati per la composizione di 3 gambe curve;
- 12 set di componenti per la composizione di ali e basi delle gambe curve;
- Due gomiti realizzati con il nuovo materiale forgiato.

Nell'ambito del PAR 2013 le attività costruttive in WT hanno recepito il programma di fornitura basato sul ritmo di consegna del nuovo materiale forgiato. I disegni e i modelli sono stati revisionati al fine di accogliere particolarità costruttive adottate sia dalla cassa Alstom che da quella ASG. In Figura 301 e 302 sono mostrate le immagini di alcuni dei componenti realizzati.

Le operazioni meccaniche hanno impegnato la ditta nella gestione di importanti saldature con l'adozione di misure precauzionali per poter controllare le possibili distorsioni sin dalle prime fasi di saldatura.

Attrezzature di contenimento, dotate di opportuni rinforzi meccanici per mantenere la posizione dei componenti durante le operazioni di saldatura, sono state studiate in considerazione della singolarità dei componenti del Tokamak JT-60SA. Durante le operazioni di saldatura è stata attentamente monitorata la temperatura tra passate successive al fine di mantenerla sempre all'interno dei limiti consentiti. Controlli dimensionali laser-traker intermedi hanno consentito il controllo continuo delle deformazioni ed il rispetto delle tolleranze del manufatto. Sono state eseguite molte saldature con processo TIG (GTAW) e EBW (Electron Beam Welding).

Le operazioni di qualifica sono state completate con la validazione del processo di distensione per vibrazione per ottenere il rilassamento dei componenti prima di lavorazioni meccaniche con grande asportazione di materiale. Inoltre sono state emesse le procedure per il controllo dimensionale, basato su laser-tracker, dei componenti meccanici in costruzione e per le operazioni di carico, trasporto e scarico della fornitura. Infine è stata messa a punto la procedura di "reverse engineering" per le lavorazioni meccaniche finali necessarie ad assicurare l'accoppiamento dimensionale dei cianfrini della gamba dritta con la gamba curva della cassa.



Figura 301. Gomiti della gamba dritta in materiale forgiato



Figura 302. Gamba curva in fase di saldatura degli accessori esterni

Ulteriori dettagli su queste attività possono essere trovati nei rapporti RdS/PAR2013/201 e RdS/PAR2013/202.

a.3 Realizzazione degli "Switching Network Unit"

ENEA è responsabile della fornitura di una parte rilevante delle alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta corrente con associati 6 trasformatori e 4 Switching Network Unit (SNU).

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 delle bobine del solenoide centrale (CS) allo scopo di produrre la tensione di loop necessaria al breakdown ed alla formazione del plasma.

Il progetto e l'ingegnerizzazione definitive (First Design Report) sono state approvate ufficialmente dal team di coordinamento internazionale di JT-60SA nel corso del 2013. Le prestazioni non comuni richieste agli SNU (in termini di corrente, tensione, energia, tempi di intervento) non potevano essere ottenute mediante dispositivi commerciali esistenti e hanno quindi richiesto un progetto specifico basato su configurazioni innovative.

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 Japan Atomic Energy Agency (JAEA). La realizzazione industriale del prototipo è stata affidata all'impresa OCEM-Energy echnology di Bologna.

Come stabilito dagli accordi internazionali, il primo passo della fornitura prevede la realizzazione di un prototipo di SNU completamente funzionante. Questo prototipo sarà a tutti gli effetti il primo SNU del CS di JT-60SA.

L'impresa OCEM-Energy Technology, sotto la supervisione dell'ENEA, ha completato l'ingegnerizzazione degli SNU e la realizzazione del prototipo in linea con quanto programmato.

Lo schema dello stato attuale del circuito di alimentazione di un modulo superconduttore del CS di JT-60SA è riportato in Figura 303. La figura evidenzia la collocazione e lo schema funzionale di uno SNU. La figura si riferisce in particolare al modulo denominato CS1, ma i circuiti di alimentazione degli altri 3 moduli differiscono solo per alcuni parametri. Infatti, nel progetto finale è stato deciso di costruire 4 SNU identici per i 4 moduli del CS.

In Figura 304 si riporta il layout concordato con i partner di progetto per la Rectifier Room di JT-60SA con il dettaglio della zona dedicata ai 4 SNU del CS ed alla loro unità di controllo denominata local control cubicle (LCC).

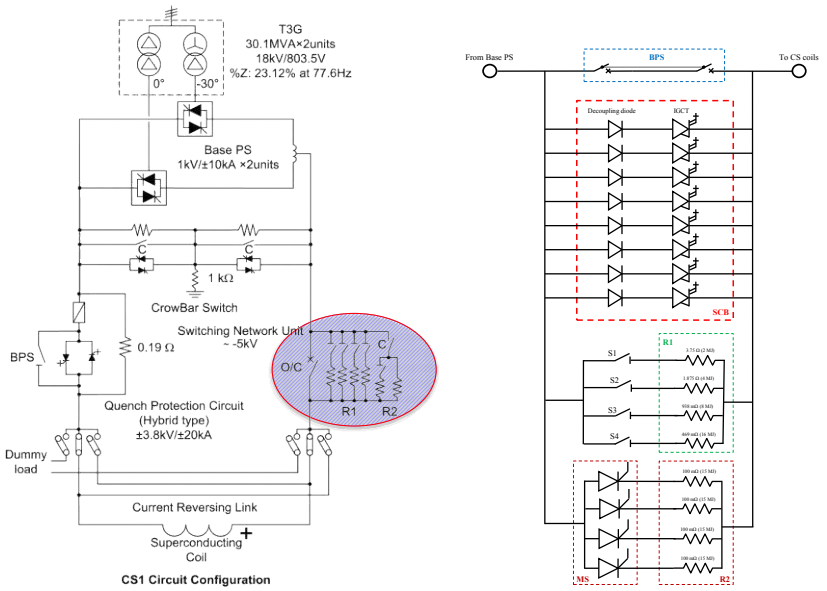


Figura 303. Circuito di alimentazione di un modulo superconduttivo del CS di JT-60SA in cui è stato evidenziato lo schema di uno SNU, riportando a sinistra i principali componenti

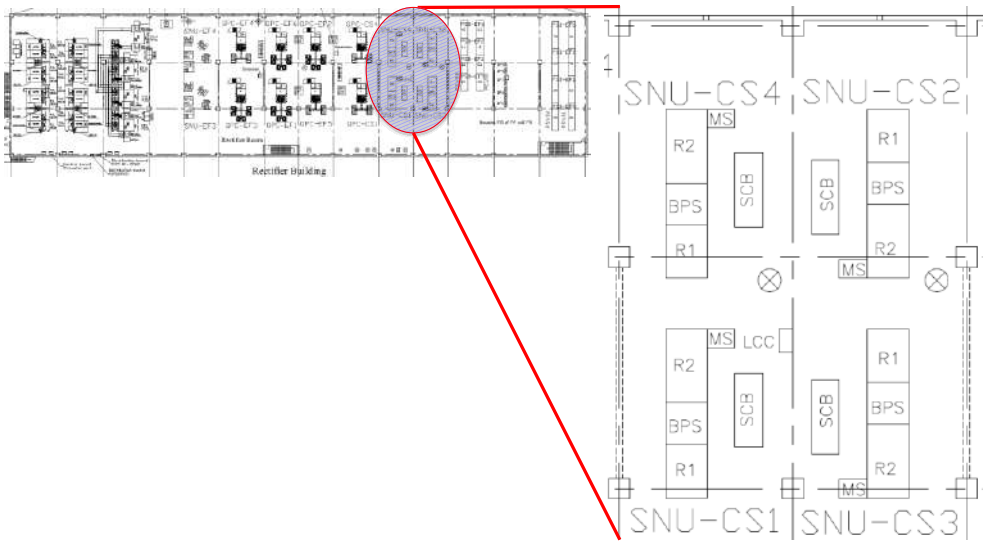


Figura 304. Layout della Rectifier Room di JT-60SA con il dettaglio della zona dedicata ai 4 SNU di fornitura ENEA

Lo SNU consiste in 6 cubicoli (armadi), incluso il local control cubicle (LCC). Al fine di ottimizzare il controllo, la sincronizzazione e le protezioni, un solo LCC gestirà tutti e 4 gli SNU. Nell'istallazione finale cambierà solo la posizione relativa dell'armadio LCC rispetto allo SNU.

Data la specificità ed unicità del sistema, era necessario validare il progetto tramite una serie esaustiva di prove sia sui singoli componenti (interruttori, resistenze, semiconduttori) sia sull'intero SNU.

Il by-pass switch (BPS) degli SNU deriva da un potenziamento di un sistema in uso in applicazioni ferroviarie. Poiché in tale ambito la tensione di lavoro è di 3 kV, il BPS non era stato mai testato alla tensione di isolamento richiesta dal circuito dei CS di JT-60SA (classe 7,2 kV). La prova di isolamento è stata effettuata con test a 20 kV e 50 Hz per 60 s. Anche gli altri elementi di potenza del prototipo sono stati sottoposti alle stesse prove di isolamento.

Durante le prove sul BPS è stato verificato che la richiesta di potenza ausiliaria allo spunto era maggiore di quella calcolata nelle simulazioni e già concordata con i fornitori dell'impianto JT-60SA. La possibilità di azionare il BPS anche in caso di oscillazioni di tensione è importante perché è legata alla sicurezza dell'impianto. Per questi motivi, è stato progettato ed installato un nuovo alimentatore ausiliario da 110 V dc basato su supercondensatori.

I meccanismi di apertura e chiusura del BPS sono stati caratterizzati attraverso 1000 sequenze complete di apertura-chiusura (in assenza di corrente). Il BPS è stato sollecitato con una corrente di 20 kA dc per 300 s per 20 volte (fine del transitorio termico) con un intervallo tra ripetizioni di 1800 s. Il BPS è stato sottoposto a una corrente a 50 Hz superiore a 41 kA di picco (29 kA efficaci) per 100 ms per 5 ripetizioni (più una per la taratura). Nel corso delle prove effettuate presso i laboratori Siemens SVEPPI, Il BPS non ha subito danni né aperture anomale durante.

I vari elementi resistivi sono stati misurati sui terminali di uscita degli armadi, quindi tenendo conto dei collegamenti e degli elementi parassiti. La resistenza di ciascun elemento si è rivelata all'interno della tolleranza prescritta del 2% con un buon margine.

La prova più critica per i resitori di breakdown è il "temperature rise test", che consiste nel dissipare adiabaticamente tutta l'energia nominale del resistore verificando che ciò non produca una variazione di resistenza superiore al 10%. Questo limite di variazione è richiesto per le operazioni di JT-60SA. Dalle prove è risultato che i resistori di breakdown sono in grado di dissipare molta più energia (fino a 3-4 volte) di quanta richiesta dalle specifiche tecniche, garantendo un buon margine anche in caso di guasto multiplo nel sistema.

Il precedente risultato è stato possibile grazie al tipo e alla quantità del materiale selezionato. Questa scelta consente anche di avere una sovratemperatura relativamente contenuta sia all'interno del materiale stesso sia nell'aria in uscita dall'armadio dei resistori verso l'ambiente circostante. Questa caratteristica è molto utile dal momento che gli SNU si trovano ad operare nella sala "Rectifier Room" di JT-60SA insieme ad altri sistemi, per cui non devono avere un impatto troppo elevato sulla temperatura dell'ambiente. La temperatura dell'aria in uscita dai resistori è stata misurata con una termocoppia durante i temperature rise test, fornendo valori molto al di sotto dei 100 °C richiesti dalle Specifiche Tecniche.



Figura 305 .Prototipo montato nella Sala Convertitori di FTU nel C.R. ENEA di Frascati

Nel Centro ENEA di Frascati sono state effettuate varie prove riproducendo le condizioni operative di lavoro dell'impianto JT-60SA. In particolare, alcune prove sono state effettuate a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV). In Figura 305 è mostrato il prototipo di SNU montato nella Sala Convertitori del Frascati Tokamak Upgrade (FTU) durante i test funzionali.

Gli scenari provati sono paragonabili, se non più onerosi, di quelli operativi di JT-60SA. Le prove sono state ripetute almeno 10 volte per ogni livello di corrente e tensione, aspettando meno dei 1800 s previsti da specifica, anche in assenza del sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata disponibile in JT-60SA.

Durante le prove funzionali della SNU completa in FTU lo schema di controllo e di sincronizzazione di JT-60SA sono stati emulati il più possibile, includendo anche gli allarmi in ingresso e uscita. Il prototipo è stato controllato mediante il prototipo di LCC, connesso via reflective memory (RM) ad un mockup del Supervising Computer (SC) finale di JT-60SA programmato e cortesemente fornito da JAEA. Particolari accorgimenti sono stati adottati per sincronizzare queste due unità con gli alimentatori di FTU, il cui controllo è basato su architetture molto differenti. Grazie a questi accorgimenti, anche i test a piena corrente e tensione sono stati eseguiti attivando le sequenze dello SNU dall'SC di JAEA operando dalla Sala Controllo Alimentatori di FTU, in coordinamento con le macchine dell'ENEA.

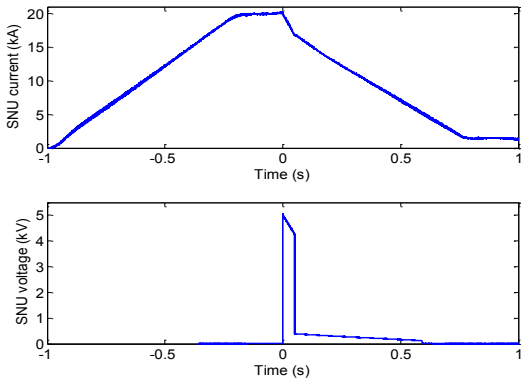


Figura 306. Correnti e tensioni misurate durante una prova a piena corrente e piena tensione effettuata in ENEA inserendo il prototipo di SNU in un circuito di alimentazione di FTU

La Figura 306 mostra la corrente nel circuito di alimentazione del trasformatore e la tensione ai capi del

prototipo di SNU misurate durante il decimo di 10 scenari di prova effettuati in condizioni nominali. Come si vede il prototipo è in grado di produrre i risultati attesi per gli esperimenti di JT-60SA. In particolare, il tempo di apertura a 20 kA e 5 kV è risultato inferiore a 80 µs, mentre la specifica permetteva di arrivare fino a 1,5 ms. Inoltre, la tensione transitoria (dannosa per i componenti) non ha superato i 5,2 kV. Per verificare la disponibilità di un ampio margine di sicurezza, la prova è stata ripetuta aprendo con un singolo ramo di SCB una corrente maggiore del 25% del valore nominale.

Dopo l'esito positivo dei test ufficiali sul prototipo, a cui hanno presenziato anche i rappresentanti dei partner internazionali F4E e JAEA, tale prototipo costituirà il primo elemento della fornitura. Gli altri 3 SNU devono essere realizzati sul modello del prototipo. Nel periodo coperto dal presente rapporto (fino a settembre 2014) sono stati realizzati i 3 interruttori elettronici SCB di questi ulteriori 3 SNU. Gli SCB sono stati dimensionati per aprire agevolmente fino a 25 kA dc, anche se opereranno in un sistema che al massimo prevede 20 kA.

Ulteriori dettagli su queste attività sono contenuti nei rapporti RdS/PAR2013/203 e RdS/PAR2013/204.

a.4 Realizzazione di parte degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA

Il sistema di alimentazione elettrica delle bobine poloidali superconduttrici di JT-60SA fornisce un profilo di corrente programmato per realizzare un campo magnetico in grado di confinare e controllare forma e posizione del plasma all'interno della camera da vuoto. Nell'ambito del programma Broader Approach, l'ENEA ha il compito di sviluppare la documentazione tecnica e realizzare tale sistema di alimentazione coordinando le attività con i partner internazionali.

In agosto 2013 ENEA ha stipulato un contratto con la ditta POSEICO-JEMA in associazione temporanea di impresa. Il contratto di fornitura è basato su specifiche tecniche e di gestione della qualità sviluppate da ENEA con la stretta collaborazione di F4E e JAEA. La fornitura consiste in:

- 4 sistemi di alimentazione per i 4 moduli denominati CS1, CS2, CS3 e CS4 del solenoide centrale;
- 2 sistemi di alimentazione per le bobine poloidali di equilibrio EF1 e EF6;
- 2 sistemi di alimentazione per il controllo veloce della posizione del plasma (FPPC).

La fornitura include il sistema di controllo e di protezione, i crow-bars, le induttanze di interfase, i relativi trasformatori, le prove di fabbrica, il sistema di imballaggio e trasporto in Giappone.

Le attività svolte nel sono descritte nei rapporti RdS/PAR2013/205 e RdS/PAR2013/206.

La documentazione tecnica relativa all'ingegnerizzazione dei sistemi è stata esaminata in dicembre 2013, discussa approfonditamente ed approvata ufficialmente da tutti i partner internazionali del progetto JT-60SA. Durante il 2014 i fornitori industriali hanno sviluppo i disegni di fabbrica e layout, i disegni meccanici e funzionali e gli schemi elettrici di potenza, protezione, misure comando e controllo degli alimentatori. Allo scopo di ottenere il massimo della modularità tutti gli alimentatori sono stati progettati impiegando solo:

- 4 tipi differenti di strutture di stack;
- 2 tipi di tiristori;
- 1 tipo di scheda per il pilotaggio dei gate;
- 1 tipo di dissipatore ad acqua;
- Un numero limitato di fusibili.

La Figura 307 mostra il layout di un alimentatore FPPC che verrà completato e provato secondo la tempistica concordata tra ENEA, fornitori industriali e partner internazionali.

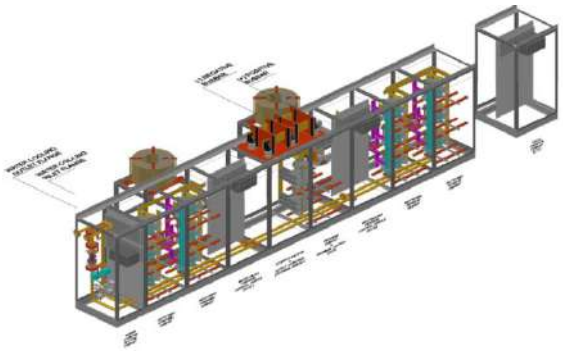


Figura 307. Layout di un alimentatore FPPC

Nell'ambito della fornitura degli FPPC, i primi componenti ad essere prodotti e provati sono stati i 4 trasformatori in resina 18kV/415V da 3 MVA, dimensionati e progettati appositamente per supportare i ponti degli alimentatori. In conformità alle norme internazionali della famiglia IEC 60076-1, tutti i trasformatori sono stati sottoposti alle prove di accettazione di routine. Secondo le procedure accettate dai partner internazionali le prove effettuate su tutti i trasformatori sono state:

- Measurement of winding resistance;
- Measurement of voltage ratio and check of phase displacement;
- Measurement of short-circuit impedance and load loss;
- Measurement of no-load loss and current;

- Dielectric tests (IEC 60076-11);
- Partial discharge measurement (IEC 60076-11);
- Temperature-rise test (IEC 60076-11);
- Determination of sound level (IEC 60076-10);

Uno dei 4 trasformatori della fornitura (con avvolgimenti D/y11) è stato sottoposto con esito positivo alle seguenti prove:

1. prova di corto-circuito presso il laboratorio CESI di Milano, ripetuta per 9 volte per ogni fase del trasformatore;
2. prova termica basata sulla misura della temperatura negli avvolgimenti secondari, tramite una sonda di temperatura collocata nel punto più caldo superiore di ciascun avvolgimento secondario. Inoltre, la distribuzione della temperatura nella resina isolante esterna è stata monitorata su quattro lati con una telecamera termografica.

b. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

b.1 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF

Sono state condotte due campagne sperimentali per il rilevamento dei fenomeni di cavitazione sull'impianto EVEDA Lithium Test Loop (ELTL) di Oarai in Giappone [rapporto RdS/PAR2013/207]. In entrambe le campagne sono stati utilizzati i sistemi CASBA per la misura della cavitazione progettati dall'ENEA. L'attività è stata articolata in accordo alle seguenti fasi:

1) completamento dell'installazione e commissioning del sistema;
2) prima campagna sperimentale;
3) seconda campagna sperimentale;
4) post analisi dei dati e risultati finali.

L'installazione dei dispositivi per la cavitazione è stata eseguita dal personale JAEA nel novembre 2013, mentre l'ENEA ha completato i montaggi dell'elettronica ancora mancante, come i sistemi di pre-amplificazione dei segnali, ed ha eseguito il commissioning della catena di misura e la sua calibrazione. Nella prima campagna sperimentale, eseguita in gennaio-febbraio 2014, sono stati monitorati due punti dell'impianto (Figura 308): il primo punto è stato individuato all'ingresso dell'ugello del target assembly, mentre il secondo punto all'ingresso della pompa elettromagnetica che garantisce la circolazione del litio nel circuito principale dell'impianto ELTL.

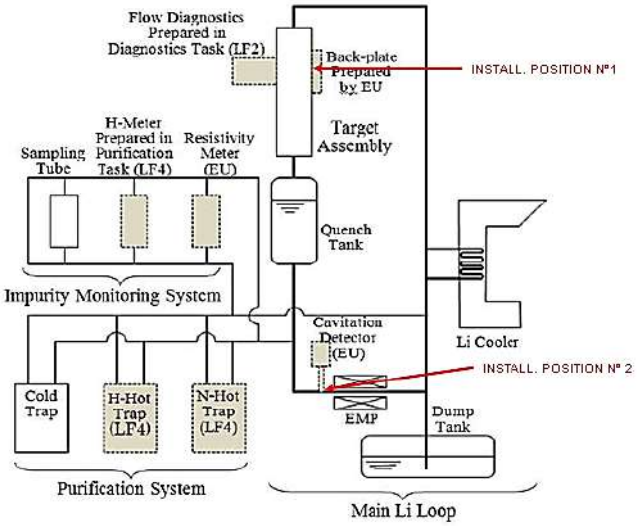


Figura 308. Punti d'installazione dei sensori CASBA 2000

La sperimentazione è stata condotta imponendo le condizioni operative tipiche di funzionamento di IFMIF. A tal fine le prove sono state eseguite in alto vuoto (10^{-3} Pa) e variando la portata del litio, a step di 150 L/min, a partire da 750 l/min fino al massimo della portata di 2250 l/min. Le prove sono state eseguite sia per valori crescenti che decrescenti del flusso di litio. Durante le prove, in entrambe le posizioni monitorate dell'impianto, non sono stati registrati fenomeni significativi di cavitazione. In particolare in ingresso alla pompa elettromagnetica vi è totale assenza di cavitazione con un flusso molto stabile, mentre alcuni disturbi, con potenziale innesco della cavitazione, sono stati rilevati a basso regime di flusso (< 750 L/min) dal sensore installato sul target assembly.

Sulla base di tali risultati, la seconda campagna sperimentale è stata interamente indirizzata al monitoraggio del target assembly. A tal fine sono stato installati due sensori CASBA 2000, come indicato in Figura 309 nelle posizioni BAR #2 e #3, in modo da monitorare sia l'ingresso che l'uscita del target assembly. Le condizioni di prova ed i valori di rumore registrati sono riportati in Tabella 88.

La misurazione è stata pertanto eseguita considerando valori variabili di velocità del litio nel range di pressione decrescenti tra 100 e 0,1 kPa. I test eseguiti hanno confermato i risultati ottenuti nella prima campagna di prove. In particolare, nella posizione in ingresso al target assembly non si sono verificati fenomeni di cavitazione mentre nella posizione di uscita è stata vericata la presenza di rumore/cavitazione nel funzionamento a bassa pressione (5 kPa) e bassa velocità di litio (7 m/s).

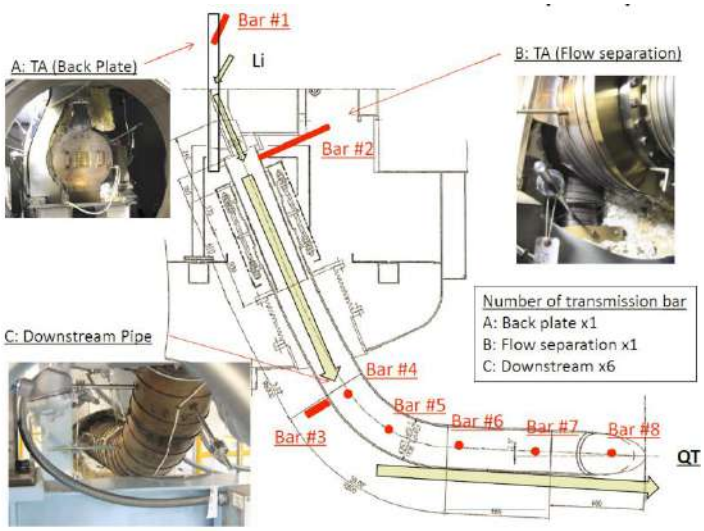


Figura 309. Posizione d'installazione dei sensori CASBA (2ª campagna sperimentale)

Tabella 88. Matrice di prova 2ª campagna e misure CASBA 2000

kPa	24-giu-14	24-giu-14	24-giu-14	24-giu-14	24-giu-14	24-giu-14	25-giu-15	25-giu-15
	15m/s-CASBA-1	15m/s CASBA-2	12m/s CASBA-1	12m/s CASBA-2	10m/s CASBA-1	10m/s CASBA-2	7m/s CASBA-1	7m/s CASBA-2
100	31	24	28	16	27	15	25	15
90	31	23	28	16	27	15	24	15
80	31	23	29	16	27	15	24	15
70	31	23	29	16	27	15	24	15
60	31	23	29	16	27	15	24	15
50	32	22	29	16	28	15	25	15
45	32	21	30	16	28	15	25	15
40	34	22	31	16	29	16	25	15
35	37	21	31	16	29	15	25	15
30	43	21	31	16	29	15	25	15
25	48	24	32	16	30	15	26	15
20	53	28	36	17	30	16	26	15
15	56	31	45	21	32	15	27	15
10	58	32	53	27	40	18	28	15
5	60	35	56	31	52	27	34	16
0,4							50	26
0,3							51	27
0,2							52	28
0,1							53	28

b.2 Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF

IFMIF è progettato per operare in litio fluente ad una temperatura di 250 °C con picchi di 300 °C. La corrosione che il litio esercita sugli acciai è ben documentata in letteratura, ma le conoscenze sui fenomeni di erosione sono abbastanza limitate. In ogni caso IFMIF per il suo funzionamento richiede un tasso ridottissimo di erosione/ corrosione (1 µm/anno per il target e 50 µm/30 anni per le tubazioni), che deve essere accuratamente verificato per poter operare in sicurezza l'impianto per tutto il tempo richiesto dalle campagne sperimentali di irraggiamento.

L'impianto Lifus6 è stato progettato e realizzato nel centro ENEA del Brasimone allo scopo di effettuare test di resistenza alla corrosione/erosione esercitata da litio liquido fluente alla temperatura di 350 °C. I materiali oggetto del test sono acciai ferritici/martensitici a bassa attivazione (RAFM), considerati quali candidati per la realizzazione dei futuri reattori nucleari a fusione. Nel corso dell'ultimo anno, l'impianto, già fondamentalmente completato per quanto riguarda le sue pipeline e la connessione dei suoi componenti principali (serbatoio stoccaggio, trappole calda e fredda per la purificazione, Resistivity Meter, sezione di prova, pompa di movimentazione e valvole) è stato finalizzato con l'installazione di:

- supporti e dispositivi di ancoraggio al telaio in corrispondenza di specifici elementi;
- dispositivi antivibrazione, in corrispondenza di pompa elettromagnetica e soffianti per air cooler;
- sensori di livello del litio, sul serbatoio di stoccaggio, sulla sezione di prova e sulla trappola calda;
- trasduttori di pressione, sia sulla linea principale che su quella secondaria di purificazione;
- vaschette di raccolta per eventuali perdite di litio;
- cavi scaldanti e termocoppie;
- sensori di perdita di litio;
- campionatore sulla trappola lalda.
- completamento linea gas argon per movimentazione litio e linea aria compressa per attivazione valvole pneumatiche (con la verifica di funzionamento di ogni valvola).

Tutto il circuito è stato quindi lavato internamente con acqua deionizzata allo scopo di rimuovere residui di lavorazione meccanica; in tale fase si sono anche verificati sperimentalmente i suoi volumi interni (loop principale: 5,80 L; loop purificazione, compresa trappola fredda: 3,83 L). Alla fine, tutto il circuito è stato coibentato per garantire un efficiente isolamento termico rispetto all'ambiente esterno. L'aspetto dell'impianto, al termine di questa operazione, è mostrato in Figura 310.

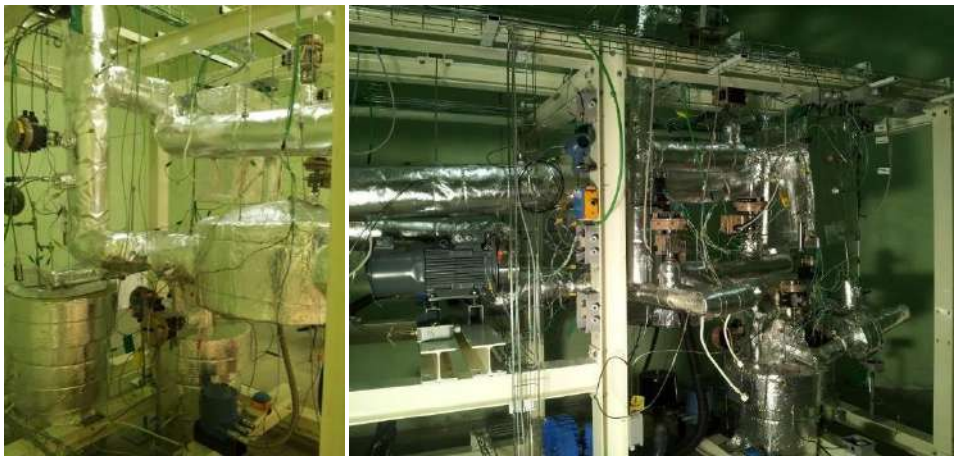


Figura 310. Impianto Lifus6 dopo il completamento della coibentazione

Nel contempo, per questioni di sicurezza, l'impianto è stato confinato all'interno di un box di contenimento in AISI 304 (4600 x 2500 x 3150 mm^3), che crea un ambiente ermeticamente chiuso tutto attorno ad esso. L'impianto non è così accessibile ad alcuno durante il suo funzionamento, essendo gestito a distanza tramite software di controllo, salvo all'atto di rimuovere, previo drenaggio e raffreddamento, il campionatore del litio per le analisi od i provini dalla sezione di prova. All'interno del box sono stati installati 4 sensori di fumo, collegati ad uno specifico pannello di controllo, in grado all'occorrenza di inondare tutto l'ambiente interno con argon ad alta pressione (da una linea dedicata) e ridurre in tempo molto rapido la concentrazione di aria al di sotto del 4%. Anche se escluso direttamente alla vista, l'impianto è comunque osservabile attraverso l'impiego di 4 videocamere motorizzate, comandate a distanza ed equipaggiate con sensori infrarossi.

Valutazioni sulla sicurezza hanno anche portato ad escludere all'operatore anche tutta la hall dell'impianto e porte tagliafuoco sono state adeguatamente installate fra essa e la sala di controllo dell'impianto.

Il sistema di Acquisizione Dati e Controllo del Sistema (DACS) è stato completato e si compone di ben 5 cabinet elettrici, in grado di gestire tutti i dispositivi dell'impianto, ivi compresa la pompa elettromagnetica e le soffianti dei due air cooler. Esso controlla più di 300 segnali di input e 100 di output. In una prima fase di collaudo, ciascuno di questi segnali è stato testato individualmente lungo il completo percorso hardware e software, verificando quindi sia la continuità delle connessioni elettriche, le chiusure dei circuiti e l'eventuale isolamento, sia

l'assegnazione dei canali di input alle variabili logiche del software e la visualizzazione delle variabili sull'interfaccia utente, verificando anche la risposta all'impostazione manuale di certe condizioni di attivazione. Successivamente è stata sviluppata una seconda versione del software di controllo, che implementa anche la codifica del principale loop di controllo e delle associate routine di sicurezza. La Figura 311 rappresenta una schermata di una finestra del software, che mostra graficamente l'impianto Lifus6 nella sua interezza, con i suoi principali parametri regolabili; altre finestre possono essere aperte, ciascuna a dettagliare ogni specifica sottosezione ed a consentire di personalizzare le relative condizioni operative e soglie di allarme.

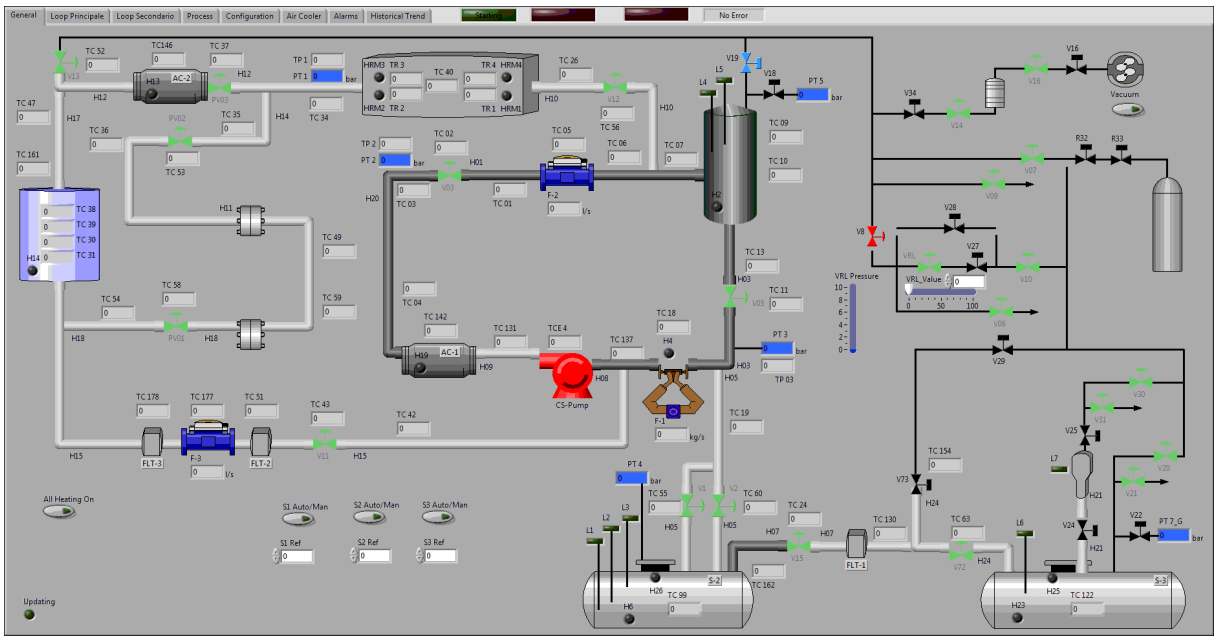


Figura 311. Schermata della finestra principale del software di controllo (visione d'insieme di Lifus6)

Con questa versione del software è stato eseguito un lavaggio dell'impianto con argon a temperature ambiente, dapprima evacuandolo e poi riempiendo con argon fino ad una pressione di 1,2 bar, ripetendo il ciclo di lavaggio 5 volte. Analoga procedura è stata eseguita portando l'impianto fino a 250° C, con riscaldamento di 10-20 °C/h, eseguendo poi test di controllo a questa temperatura per un totale di 10 giorni. Questi test, oltre a rimuovere l'umidità e le impurezze gassose residue, hanno consentito, in particolare: di testare l'efficacia del materiale coibente; di verificare i sensori, gli attuatori e controllori dei molteplici canali scaldanti; di verificare il funzionamento degli aircoolers; di verificare il riscaldamento interno della pompa elettromagnetica; di testare le prestazioni del resisitivity meter e la stabilità del suo sistema di regolazione della temperatura. Tutti i parametri operativi sono stati registrati con frequenza di campionamento di 1 Hz e salvati nella memoria del computer.

Le attività relative alla realizzazione e commissioning dell'impianto LiFus6 per lo studio dei fenomeni di erosione/ corrosione da litio sono descritte nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/208.

b.3 Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF

Uno dei requisiti essenziali dei test di resistenza alla corrosione/erosione di materiali esposti a litio fluente a 350 °C all'interno dell'impianto Lifus6 è l'elevato grado di purezza del litio liquido: la presenza di impurezze non metalliche (carbonio, ossigeno, idrogeno ed in special modo azoto), aumenta infatti fortemente il comportamento corrosivo del metallo liquido. Per tale motivo, l'impianto Lifus6 è equipaggiato 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.

A seguito dei ritardi accumulati ed il conseguente rinvio della campagna sperimentale da condurre su Lifus6 le attività pianificate, relative alla purificazione del litio circolante in Lifus6, sono state posticipate ed è stata effettuata la validazione della procedura di analisi offline della purezza del litio [rapporto RdS/PAR2013/209]. Tale attività è propedeutica a quella finale da applicare in Lifus6 che sarà svolta nella prossima annualità.

La procedura di analisi di campioni di litio è finalizzata alla determinazione quantitativa dell'azoto contenuto all'interno del litio stesso. Tale determinazione è di primaria importanza, giacché è noto come il comportamento corrosivo del litio liquido nei confronti dei materiali strutturali sia fortemente accentuato proprio dall'entità delle impurezze di azoto. A tal riguardo, i requisiti operativi delle prove di resistenza alla corrosione da effettuarsi con l'impianto Lifus6 all'interno del progetto IFMIF impongono, come citato, il vincolo di 30 wppm quale massima concentrazione di azoto in litio.
La procedura di analisi è una metodica offline, nella misura in cui non produce un risultato continuo ed in tempo reale della qualità del litio circolante nell'impianto, ma fornisce un risultato su uno specifico campione di litio, prelevato in maniera periodica e definita dall'impianto. A dispetto del piccolo ritardo nella risposta e della laboriosità, tale procedura risulta comunque caratterizzata da elevata sensibilità, notevole accuratezza e buona riproducibilità.
La procedura, già delineata nel precedente PAR [rapporto RdS/2013/126], è stata ottimizzata attraverso la sostituzione dell'acido borico con acido cloridrico concentrato, quale agente acidificante nella soluzione di raccolta dell'ammoniaca distillata, avendo verificato un non trascurabile apporto di impurezze di sodio da parte dell'acido borico, in grado di inficiare la buona valutazione del picco cromatografico dello ione ammonio.

In glove box è stato effettuato lo studio della reazione litio-acqua, impiegando litio commerciale in granuli con un valore di impurezza di azoto inferiore a 300 wppm. I risultati numerici delle analisi, effettuate su 4 campioni diversi dello stesso litio, sono apparsi piuttosto riproducibili, tenuto conto dei valori in assoluto bassi di azoto (nel corso delle prove reali di Lifus6 potremmo avere anche valori fino a 1000 wppm). La Tabella 89 riporta alcuni risultati delle prove effettuate.

Tabella 89. Risultati del contenuto di azoto nel litio commerciale analizzato

Esperimento	Massa di litio reagita [g]	Massa di azoto misurata [mg]	Concentrazione di azoto in litio [wppm]
1	0,6521	0,0115	17,6
2	0,9885	0,0178	18,0
3	0,8415	0,0175	20,8
4	0,8784	0,0221	25,2
Media 1-4			**20,4**
5	0,8545	0,0377-0,0194 = 0,0183	**21,4**

Per verifica dell'accuratezza del risultato (visto che non si dispone di uno standard a concentrazione nota), è stata eseguita un'analisi col metodo dell'aggiunta (esperimento 5), ossia aggiungendo ad un campione di litio, invece di semplice acqua, una soluzione acquosa di cloruro di ammonio contenente esattamente 25 μg di ione Ammonio (ossia 19,4 μg di azoto). Il risultato ottenuto, tenuto conto della sottrazione della quantità nota aggiunta, appare molto prossimo alla media dei primi 4, indicando che nessuna significativa perdita o contaminazione avviene nel corso della procedura e confermando quindi la validità di tutti i risultati. Un'ulteriore conferma della validità della procedura è giunta anche dal confronto dei risultati delle analisi eseguite da parte di ENEA su un altro campione di litio inviato dal JAEA (224±4 wppm), con il risultato dell'analisi, eseguito sullo stesso litio e con procedura sostanzialmente analoga, da parte del JAEA stesso (231±7 wppm). L'accordo dei risultati è senz'altro buono.

Come detto, la procedura di analisi serve a monitorare il grado di impurezze di azoto in litio. Allo scopo di ridurre tale valore al di sotto dei 30 wppm, l'impianto Lifus6 è stato equipaggiato con una trappola calda, ossia un dispositivo in grado di rimuovere l'azoto tramite l'adsorbimento da parte di un getter di spugna di titanio. Al fine di predire la cinetica del processo di purificazione, si è eseguita una caratterizzazione del getter impiegato, volta in special modo a determinare il valore della sua area superficiale. Impiegando la Tecnica della Porosimetria ad Inclusione di Mercurio (MIP), grazie al supporto dell'Istituto per lo Studio degli Ecosistemi del CNR di Sesto Fiorentino, è stato ricavato un valore di 4,7 m^2/g. Tale valore, che si traduce in un'estensione totale del getter pari a circa 35000 m^2, è certamente approssimato, ma comunque l'ordine di grandezza di tale valore porta a predire un tempo teorico per la purificazione di tutta la massa di litio inferiore ad un secondo. Il valore esatto sarà calcolato solo durante l'esecuzione reale della fase di purificazione, subito dopo il caricamento dell'impianto con litio, ma intanto tale previsione pone un certo ottimismo sull'efficienza della trappola calda.

b.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

Il contributo ENEA nell'ambito di questa linea di attività riguarda la dimostrazione della fattibilità di tutte le operazioni di ricondizionamento e di sostituzione del target assembly (TA) di IFMIF.

Il lavoro svolto in questa annualità ha riguardato la realizzazione dei modelli 3D dei tools di Remote Handling (RH) ancora mancanti, la simulazione e ottimizzazione delle procedure di manutenzione del target assembly di IFMIF e una stima dei tempi d'intervento. Tutte la attività sono state sviluppate in ambiente CATIA V5/DELMIA della Dassault Systems. Le attività di sviluppo sono state suddivise in più fasi come di seguito indicato:

- Modellazione 3D dei tool di RH ancora mancanti e creazione dei modelli cinematici di tutte le attrezzature
- Definizione del layout dell'area di lavoro della DRP (Divertor Test Platform)
- Simulazione delle procedure di manutenzione del TA di IFMIF e stima dei tempi di ricondizionamento della BP e del TA di IFMIF.

Per poter avviare lo sviluppo delle attività di simulazione è stato necessario creare i modelli 3D dei tools mancanti, a partire dalla documentazione esistente (disegni 2D e foto), e ricostruire i modelli cinematici di tutte le attrezzature coinvolte nelle attività di simulazione. Le attività di modellazione 3D sono state sviluppate utilizzando gli ambienti "part design" e "assembly design" di CATIA V5. La definizione della cinematica di ogni componente è stata invece sviluppate nell'ambiente "device building" di DELMIA. I componenti oggetto della modellazione 3D sono stati:

1. avvitatore angolare
2. avvitatore dritto
3. plasma facing components transporter (PFCT)
4. supporto di sostegno e stoccaggio avvitatore angolare
5. supporto di sostegno e stoccaggio avvitatore dritto
6. supporto di sostegno e stoccaggio dei cleaning tools
7. supporto di stoccaggio della backplate.

Ultimata la fase di modellazione 3D si è passati alla definizione della cinematica di tutte le attrezzature necessarie per le attività di rigenerazione del TA di IFMIF. In particolare, a partire dalle specifiche tecniche di ogni singolo componente sono stati definiti tutti i vincoli cinematici e i relativi comandi necessari per le attività di simulazione, in altre parole è stata ricostruita in ambiente virtuale la cinematica di ogni singolo componente costituente la DRP. A partire dagli output prodotti nella fase di sviluppo precedentemente descritta si è passati poi alla definizione del layout dell'area a diposizione per le attività di rigenerazione del TA di IFMIF. Le ipotesi utilizzate alla base della definizione del layout della DRP sono state:

- il tempo di residenza dei tools all'interno della Test Cell (TC) deve essere minimizzato;
- minimizzazione del numero di movimentazioni che ogni dispositivo deve effettuare.

Considerando che, sulla parte superiore del carroponte è stato installato il PFCT che ha la capacità di traslare lungo l'asse X (Figura 312) e che su tale componente è montato anche il braccio telescopico che può scorrere nella stessa direzione, si è deciso di localizzare su due aree diverse i componenti che dovranno essere manipolati da ciascun attrezzo. Tutto ciò al fine di evitare sovrapposizioni dei due componenti (PFCT e braccio telescopico) durante le fasi di manovra.

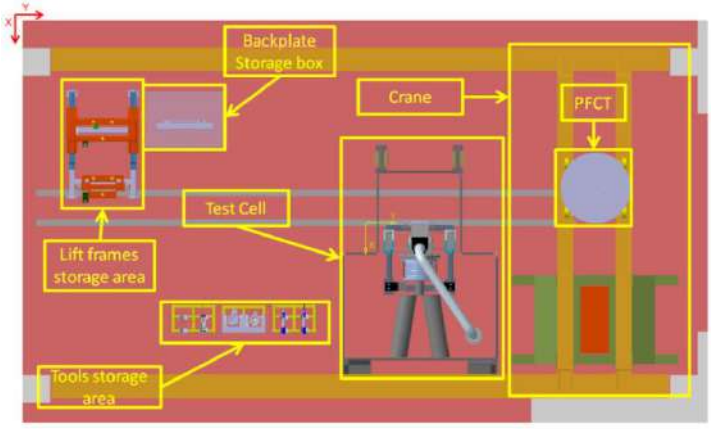


Figura 312. DRP layout

Come mostrato in figura, gli attrezzi utilizzati per la movimentazione della backplate, del TA e della cassa di stoccaggio della backplate sono localizzate tutte dallo stesso lato (in alto nella figura), mentre le attrezzature che verranno manipolate dal braccio telescopico sono state posizionate dal lato opposto rispetto alle precedenti (in basso nella figura). Questa configurazione da un lato riduce il numero di movimentazioni che ogni componente deve effettuare e dall'altro evita possibili sovrapposizioni tra il PFTC ed il braccio telescopico.

E' da notare che lo sviluppo e l'ottimizzazione del layout dell'intera area è stato effettuato parallelamente allo sviluppo delle attività di simulazione del ricondizionamento della backplate del TA di IFMIF secondo l'ottica del concurrent engineering.

Lo sviluppo delle simulazioni delle attività di ricondizionamento del TA di IFMIF ha avuto inizio dallo studio di un preliminare layout dell'area a disposizione. Procedendo con le attività di simulazione, attraverso un percorso iterativo, si è arrivati prima alla definizione del layout ottimale ed infine alla finalizzazione delle simulazioni virtuali e dei filmati.

Le attività di sviluppo dei filmati delle attività di manutenzione fornisce agli addetti la possibilità di confrontarsi con il modello virtuale dell'intera stazione di lavoro; in questo modo è stato possibile procedere all'ottimizzazione dei percorsi di lavoro delle singole attrezzature. Sono state quindi simulate la procedura di sostituzione della backplate (Figura 313) e la procedura di sostituzione dell'intero target.

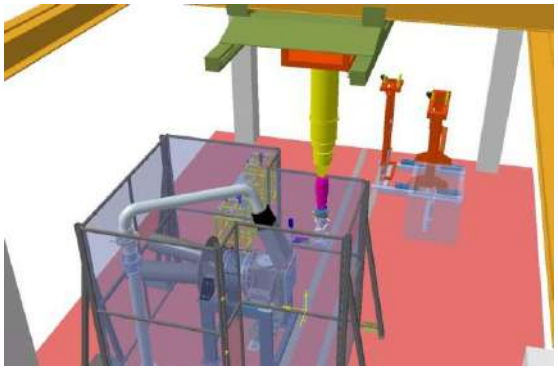


Figura 313. Ricondizionamento backplate

A partire dalle procedure di manutenzione simulate si è passati alla stima e verifica dei tempi di esecuzione di ogni singola operazione.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni sono state tratte le seguenti conclusioni:

- le procedure di manutenzione implementate permettono un completo ricondizionamento/ sostituzione del target assembly di IFMIF;
- i tempi d'intervento misurati sono in buon accordo con quelli ottenuti dalle attività di validazione.

La validazione del progetto del concetto Europeo del target per IFMIF passa necessariamente dalla verifica delle sua manutenibilità e ricondizionamento [rapporto RdS/PAR2013/210]. Infatti le condizioni operative ed ambientali in cui il target assembly di IFMIF si trova ad operare sono molto critiche (riscaldamento, neutroni e fotoni) e pertanto il ciclo di manutenzione preventiva prevista per il ricondizionamento o la sostituzione di tale componente deve a essere eseguito ogni anno ed avere una durata massima non superiore a 7 giorni (la manutenzione preventiva annuale di tutto l'impianto IFMIF ha una durata massima di 20 giorni).

Per soddisfare il requisito di massima durata della manutenzione e per garantire quindi la continuità di esercizio di IFMIF è stata implementata una strategia di manutenzione del target assembly che permette di affrontare tale fase con la giusta flessibilità: cambiare l'intero target assembly con uno nuovo o sostituire il bersaglio (backplate) e ricondizionare la restante parte del target.

La validazione sperimentale delle procedure di manutenzione, tenendo in conto tutti gli scenari previsti dalla strategia implementata, è stata eseguita presso la Divertor Test Platform (DRP) dell'ENEA Brasimone. In particolare sono state testate le seguenti operazioni di manutenzione:

1) sostituzione del bersaglio del target di IFMIF;
2) sostituzione dell'intero target.

Le operazione di manutenzione, le cui procedure sono state ottimizzate per mezzo delle simulazioni in ambiente di realtà virtuale, sono state validate utilizzando i prototipi (figura 314) in scala reale del target e della test cell (l'area di IFMIF in cui il target è installato). In figura 315 alcune fasi delle operazione di sostituzione del bersaglio e del target assembly

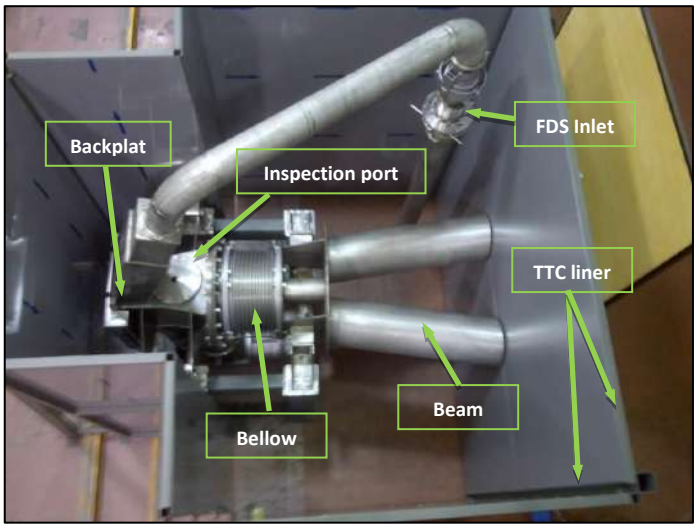


Figura 314. Prototipi del target assembly e della test cell di IFMIF



Figura 315. Rimozione del bersaglio rimovibile e del target assembly

In totale sono state eseguite quattro operazioni di sostituzione del bersaglio ed altrettante del target. Le prove di manutenzione eseguite hanno consentito di dimostrare la fattibilità delle principali operazioni da eseguire per la sostituzione del target entro i tempi d'intervento previsti. I tempi d'intervento medi cumulativi per le operazione di rimozione/installazione sono riportati in Tabella 90.

Tabella 90. Tempi medi d'intervento per la sostituzione del target e del bersaglio rimovibile

Componente	Operazione	Tempo medio d'intervento
Bersaglio	Installazione/rimozione	11^{h} 26'
Intero target	Installazione/rimozione	23^{h} 36'

Malgrado vi siano ancora delle operazioni di manutenzione non validate, come la pulizia delle flange di tenuta, i tempi residui per il completamento delle operazioni di sostituzione lasciano ampi margini per la finalizzazione dei rimanenti tasks di manutenzione da eseguire su tali componenti.

b.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target assembly per IFMIF

Progettazione dei sistemi ausiliari del target assembly di IFMIF

Nell'ambito delle attività di progettazione del target assembly (TA) di IFMIF, e in particolare della simulazione del suo comportamento termomeccanico, è stato sviluppato un modello tridimensionale agli elementi finiti che riproduce l'intera geometria del sistema (Figura 316) inclusi il telaio (framework) di supporto e il tubo di ingresso del litio (inlet pipe) fino ad ora non considerati nei modelli precedenti. E' stata condotta un'analisi di insensibilità dei risultati alla mesh che ha permesso di selezionare un'appropriata griglia di calcolo in grado di fornire risultati accurati in un tempo ragionevole. A questo proposito, è stata selezionata una griglia composta da circa 400.000 nodi connessi in circa 1.500.000 di elementi tetraedrici che consente di completare le simulazioni numeriche in un tempo di circa 3 ore. Le attività sono descritte in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2013/212.

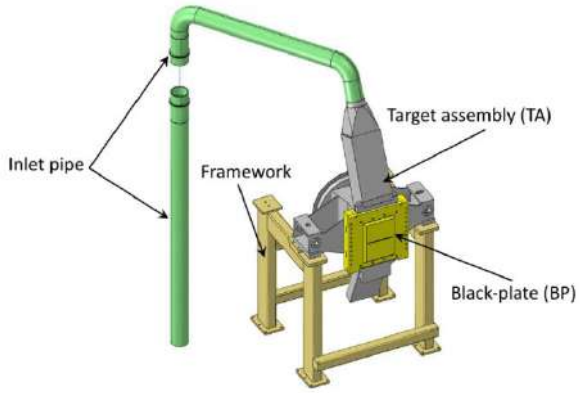


Figura 316. Modello del TA di IFMIF comprensivo del framework di supporto e del tubo di ingresso litio

Il materiale del TA, del framework di supporto e del tubo di ingresso del litio è stato assunto essere l'acciaio ferritico/martensitico a ridotta attivazione EUROFER. Per simulare il comportamento meccanico di quest'ultimo è stato adottato un modello elastico lineare isotropo con costanti elastiche dipendenti dalla temperatura. Il flusso di litio è stato anch'esso considerato nel modello al fine di simularne l'interazione termica con il TA. L'accoppiamento meccanico tra le due parti del tratto verticale dell'inlet pipe (Figura 316), realizzato mediante un giunto cardanico, è stato simulato imponendo un opportuno vincolo cinematico caratterizzato da una costante elastica angolare desunta dai datasheet del costruttore (4,2 Nm/°).

I carichi meccanici e le relative condizioni al contorno considerati nell'analisi comprendono: la forza peso, la pressione esterna ed interna, la forza di serraggio dei bulloni presenti sulla backplate, la forza di schiacciamento dovuta al sistema di pattini della BP, i vincoli meccanici (incastri) applicati ai piedi del telaio di supporto e del tubo di inlet, i vincoli cinematici applicati al giunto cardanico, e i vincoli meccanici e di contatto applicati tra gli appoggi del TA e il framework.

I carichi termici e le relative condizioni al contorno includono: la densità volumetrica di potenza termica depositata dai neutroni e dai fotoni gamma, la convezione forzata tra flusso di litio e TA, la trasmissione di calore tra BP e modulo ad alto flusso (high flux test module, HFTM) ad essa affacciato e tra corpo del target e canale dell'acceleratore, irraggiamento interno ed esterno, convezione naturale sul TA e raffreddamento del telaio di supporto. Una densità di potenza termica pari a 40 GW/m^3 è stata supposta essere uniformemente distribuita all'interno della zona del footprint internamente al dominio occupato dal litio, al fine di simulare la deposizione di potenza dovuta all'interazione tra i fasci di deutoni e i nuclei di litio.

Allo scopo di valutare le esigenze di raffreddamento del telaio di supporto, è stato simulato il trasferimento di calore per convezione tra la sua superficie esterna e l'atmosfera di elio che riempie il volume della camera (test cell) in cui è installato il TA. In particolare, sono state considerate due differenti condizioni:

- Condizione 1: convezione naturale con coefficiente h_{atm} = 10 W/(m^2 °C)
- Condizione 2: convezione forzata con coefficiente h_{atm} = 1000 W/(m^2 °C).

E' stata inoltre considerata un'ulteriore condizione che prevede la circolazione di acqua di raffreddamento, ad una temperatura di bulk di 50 °C e a pressione atmosferica, in un circuito ricavato internamente al telaio. Il coefficiente efficace di scambio termico interno tra acqua e telaio (h_{int}) è stato stimato considerando l'estrazione dei circa

300 W di potenza termica generati all'interno del telaio (dedotti dalla condizione 1) per mezzo di una portata d'acqua di 0,2 kg/s con un salto termico di 0,36 °C:

- Condizione 3: convezione forzata interna con h_{int}= 13336 W/(m^2 °C) + convezione naturale esterna con h_{atm} = 10 W/(m^2 °C).

Le analisi termomeccaniche sono state condotte considerando le condizioni operative nominali (temperatura ingresso Li = 250 °C; velocità uscita Li dall'ugello=15 m/s). Gli output di calcolo di interesse hanno riguardato: il campo termico nel TA (Figura 317) la distribuzione di stress equivalenti di Von Mises; gli spostamenti dei nodi della BP che si affacciano all'HFTM (Figura 318).

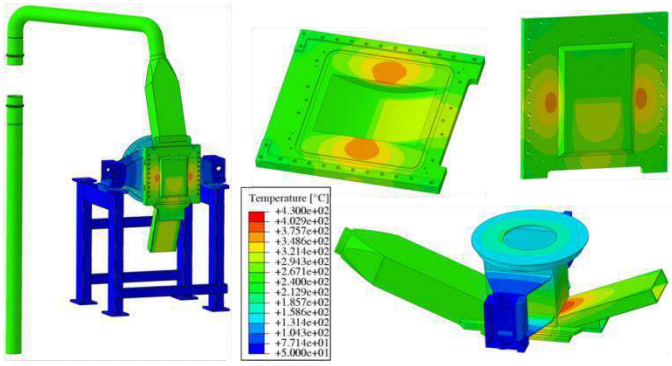


Figura 317. Campo termico calcolato nel TA

I risultati ottenuti hanno mostrato che tra tutte quelle considerate, la condizione 1 è quella che permette di avere gli spostamenti minimi del nodo centrale della BP. In particolare, in questo caso, si ha il minimo disallineamento tra fascio di deutoni e regione del footprint e inoltre viene scongiurato il contatto tra superficie esterna della BP e HFTM in quanto lo spostamento massimo calcolato (1,081 mm, Figura 318) è inferiore al gap nominale (2 mm) previsto tra i due componenti.

Al fine di controllare l'integrità strutturale della BP, è stata inoltre condotta una verifica secondo i criteri della normativa di progettazione ITER SDC-IC (Structural Design Criteria for In-vessel Component) basata sulla linearizzazione degli stress (stress breakdown), ricavando le componenti membranali e flessionali di tensione (relativamente alla condizione 1) su alcuni percorsi significativi individuati sulla sezione mediana della BP (Figura 318) e confrontandoli poi coi relativi valori ammissibili.

I risultati della verifica hanno confermato la capacità generale del sistema di sopportare i carichi applicati, sebbene si siano evidenziate alcune criticità in certe zone che suggeriscono la necessità di un ulteriore miglioramento del design della BP al fine di raggiungere una configurazione ottimale della stessa.

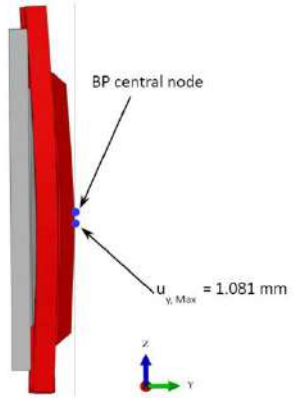


Figura 318. Spostamenti calcolati nei nodi esterni della BP e configurazione deformata

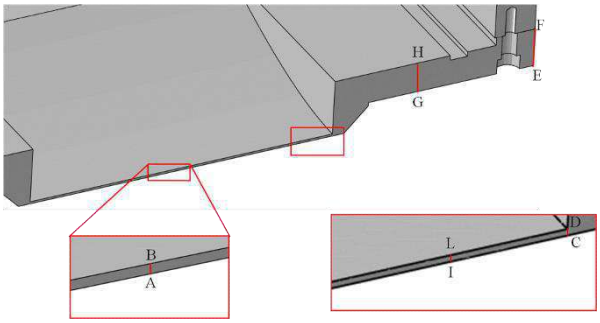


Figura 319. Percorsi selezionati sul piano mediano della BP per la linearizzazione degli stress

Analisi preliminare di materiali alternativi per la realizzazione del target assembly di IFMIF

L'obiettivo dell'attività è stato quello di progettare e di produrre un piccolo cast di acciaio inossidabile martensitico a ridotta attivazione per le applicazioni di fusione, fabbricato dal Centro Sviluppo Materiali (CSM). Dettagli sul lavoro svolto sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/213.

I risultati degli studi europei sulle leghe martensitiche per applicazioni di fusione, che hanno individuato l'EUROFER 97 come lega di riferimento, hanno dimostrato che la limitazione principale nell'uso di questa lega è l'infragilimento dovuto a irraggiamento neutronico a temperatura inferiore a circa 380 °C. Questo comportamento è dovuto primariamente ai loop di interstiziali generati dalla radiazione che, a circa 400 °C, induriscono la matrice, inducendo la lega ad avere un comportamento fragile. Questo fatto è comune a tutte le leghe sviluppate per le applicazioni di fusione (9Cr2WVA ORNL, F82H ecc.) ed è ben documentato in letteratura.

Risultati recenti su EUROFER 97 sottoposto a trattamento termico a 1040 °C per 30 min + 760 °C per 1h (EUROFER WB) mostrano un buon comportamento dopo l'irraggiamento con neutroni a bassa temperatura, se confrontato con l'EUROFER 97 "trattato standard". Questi risultati implicano che è importante non solo la riduzione della dimensione di grano per diminuire DBBT e spostamento della DBBT ma anche la temperatura di austenitizzazione: è importante avere una precipitazione primario fine per avere un comportamento migliore dopo irraggiamento. La temperatura di austenitizzazione di 980 °C per 1 h ("trattamento standard"), anche se produce una granulometria più fine, produce tuttavia una grande quantità di precipitazioni primaria (bassa temperatura di normalizzazione).

D'altra parte studi datati e recenti indicano che esiste una relazione tra loop di interstiziali generati sotto irraggiamento a bassa temperatura e contenuto in cromo: i loop interstiziali sono proprio arricchiti in cromo. Questo fatto è stato verificato anche nell'acciaio FV448, studiato nel quadro del vecchio programma europeo "Fast Breeder Reactor".

D'altra parte, l'analisi dei dati sperimentali su diverse leghe irraggiate con composizione chimica e quantità di cromo diversa ha indicato che lo spostamento minimo della DBTT è dato dalla quantità di cromo 9% nominale.

I requisiti EUROFUSION recenti indicano che il primo reattore DEMO sarà raffreddato ad acqua. Ciò implica che la temperatura minima di irraggiamento sarebbe di circa 280 °C. Così, alla luce del comportamento sotto irraggiamento di EUROFER, si è deciso di sviluppare una lega più tenace, in grado di tollerare la bassa temperatura di irraggiamento. Le linee guida usate per ottenere questo requisito sono illustrate di seguito:

- ridurre la quantità di cromo compatibilmente con il comportamento a corrosione e nel range degli acciai RAFM per cui esistono dati bibliografici (ad es F82H);
- ridurre il contenuto di azoto per avere una matrice leggermente più morbida e ridurre le precipitazioni secondarie alla temperatura di rinvenimento;
- ridurre la quantità di vanadio per gli stessi motivi;
- mantenere le concentrazioni Ta e carbonio allo stesso valore di Eurofer per avere la precipitazione primaria necessaria per affinare la granulometria;
- studiare l'effetto dei trattamenti di austenitizzazione multipla prima del rinvenimento in modo da avere poi allo stesso tempo piccola dimensione del grano e precipitazione primaria di TaC più fine e di fissare, dopo le indagini, il tratta-mento di normalizzazione e rinvenimento.

Dopo diverse simulazioni termodinamiche con il software Thermocalc (Figura 320) è stata fissata la composizione chimica e la specifica che è stata fornita a per fabbricare il lingotto. (Figura 321). La specifica di composizione

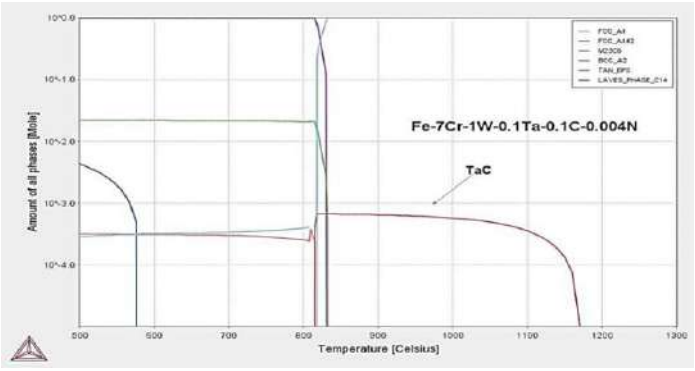


Figura 320. Calcoli termodinamici della quantità di fasi stabili tramite Thermocalc. La temperatura di soluzione dei carburi primari TaC risulta dai calcoli 1180°C

chimica del 7Cr1WTa è quella riportata in Tabella 91. Lo studio dei trattamenti termici, le caratterizzazioni micro-strutturali e quelle meccaniche saranno oggetto di indagini future.

Tabella 91. Specifica chimica di produzione del 7Cr1WTa

Elemento	Min-Val (wt %)	Max-Val (wt %)	Target (wt %)
Cr	6.8	7.2	7
C	0.08	0.12	0.1
Mn	0.09	0.11	0.1
V		<0.05	
W	1.0	1.2	1.0
Ta	0.05	0.11	0.10
Si	0,03	0,05	0,04
P		<0,006	a.l.a.p
S		<0,005	a.l.a.p
Ni		<0,02	
Mo		<0,01	a.l.a.p.
Nb		<0,01	a.l.a.p
Al		<0.01	a.la.p
B		A.l.a.p	a.l.a.p
N		<0,01	
O		<0,004	a.l.a.p
Co		<0,01	a.l.a.p
Cu		<0,01	
Zr		<0,005	
Ce		<0,005	
Ti		<0,01	
As		<0,005	a.l.a.p
Sb		<0,005	a.l.a.p
Sn		<0,005	a.l.a.p
Fe			bal



Figura 321.Lingotto 7Cr1WTa

Studio preliminare di sorgenti neutroniche alternative da 14 MeV

Nel panorama delle attività finalizzate a testare il comportamento dei materiali sottoposti ad irraggiamento neutronico con spettro caratteristico della reazione D-T, per la valutazione del loro possibile impiego nei futuri reattori a fusione nucleare, è stato recentemente proposto da ENEA lo studio di una sorgente neutronica di più semplice concezione rispetto alla macchina IFMIF e basata su tecnologie già mature, in grado di ottenere, entro il prossimo decennio, un primo set di dati utili con cui poter procedere alla progettazione del reattore DEMO. Tale soluzione prevede l'adozione di un fascio misto di ioni D(50%)-T(50%) che, accelerati e inviati contro un bersaglio caricato con gli stessi ioni D-T del fascio, innescano le reazioni di fusione nucleare. Il target, costituito da una ruota che porta fissate alla periferia le piastrine bersaglio (Figura 322), viene mantenuto in rotazione al fine di diminuire la densità di potenza termica (mediata su un periodo) incidente. Allo scopo di effettuare una valutazione preliminare dello stato di sforzo che grava sulla struttura portante della ruota che sorregge le piastrine bersaglio, è

stata eseguita un'analisi della struttura stessa mediante un modello tridimensionale agli elementi finiti (FEM) implementato tramite il codice di calcolo FEM- ANSYS©. La struttura in esame, mostrata in Figura 322b, è costituita da due anelli, non meccanicamente connessi tra loro, di acciaio maraging ad altissima resistenza (limite elastico di circa 2400 MPa) aventi un raggio di 4 m e un diametro della sezione circolare pari a 30 mm. Gli anelli sono collegati al mozzo centrale della ruota da una serie di razze anch'esse in acciaio maraging a sezione circolare con un diametro di 10 mm. La velocità di rotazione della ruota è di 800 rpm, tale da consentire, concordemente ai risultati dei calcoli termici preliminari effettuati, di mantenere la temperatura delle piastrine bersaglio a livelli accettabili.

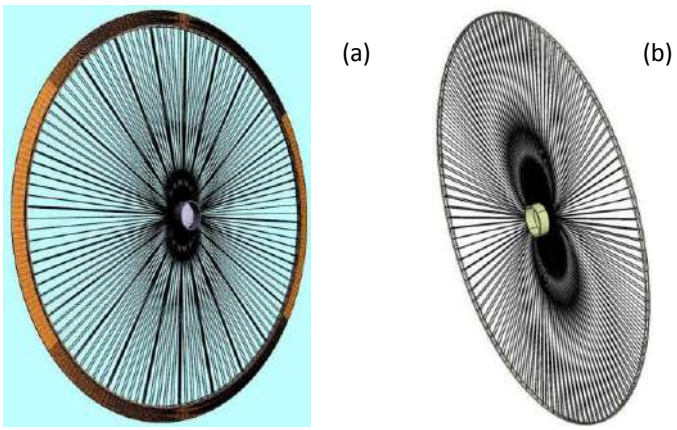


Figura 322. Modello 3D complessivo del target (a) e sua struttura portante (b)

L'analisi è stata condotta utilizzando un modello statico di tipo elastico lineare con costanti elastiche uniformi in tutta la struttura. I carichi che sono stati considerati sono i seguenti:

- forza volumetrica centrifuga indotta dalla rotazione della ruota su tutta la struttura;
- carico uniformemente distribuito sulla circonferenza degli anelli, risultante dall'effetto centrifugo indotto sulle piastrine (effetto "pala di turbina");
- carico uniformemente distribuito sulla circonferenza degli anelli, risultante dalla pressione dell'acqua di raffreddamento agente sul "tappo" di chiusura posto in testa alla piastrina;
- pressione dell'acqua all'interno del mozzo;
- peso proprio.

Sono stati inoltre tenuti in conto, tramite opportune condizioni al contorno, i vincoli meccanici esterni e le condizioni di simmetria polare caratteristiche della struttura. La modellazione FEM del sistema (Figura 323) è stata eseguita utilizzando 50.350 elementi "SOLID" tipo brick ad 8 nodi, e 930 elementi "Beam" a 2 nodi e prendendo in considerazione solamente un settore angolare (sfruttando le suddette condizioni di simmetria) al fine di semplificare la discretizzazione geometrica e ridurre conseguentemente lo sforzo computazionale.

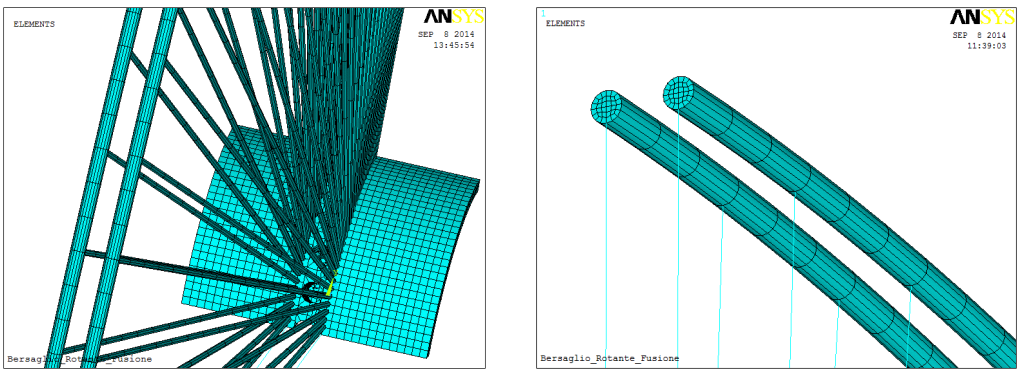


Figura 323.Modellazione FEM 3D della struttura portante del target

I risultati dell'analisi mostrano che lo stato tensionale che si instaura (Figura 324) è tale da poter escludere una crisi strutturale su larga scala del sistema. In generale la ruota, a cui sono fissate le piastrine che costituiscono il

bersaglio vero e proprio, non sembra soggetta ad uno stato di sollecitazione tale da richiedere una revisione approfondita del dimensionamento preliminare. L'integrità strutturale del bersaglio rotante sembra essere pertanto garantita. Si osserva tuttavia come il valore delle tensioni di Von Mises, nei punti di attacco razze-mozzo e nella parte inferiore delle razze raggiunga quasi il limite di elasticità, mentre i valori di deformazione risultano essere comunque tali da non determinare stati di danneggiamento estesi. Valori similari di tensione sono stati calcolati anche in corrispondenza del collegamento razza-anelli esterni. Da quanto indicato si può concludere che un aggiornamento del design delle razze potrebbe essere necessario per incrementare il margine di sicurezza della struttura. Ulteriori approfondimenti si rendono comunque necessari al fine di analizzare più in dettaglio il comportamento del mozzo e degli anelli e dei collegamenti di questi ultimi con le razze.

Per maggiori informazioni sull'attività svolta si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/214.

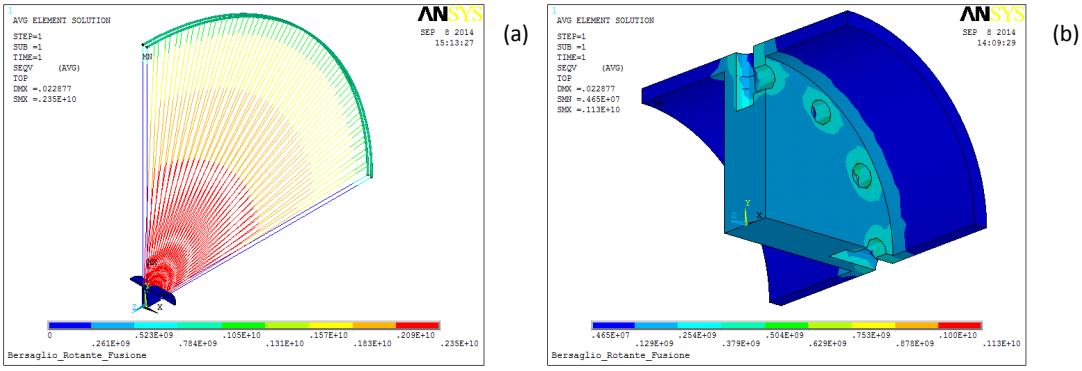


Figura 324. Distribuzione delle tensioni di Von Mises sulla struttura rotante (a) e sul mozzo (b)

c. Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)

c.1 Studio di compositi in SiC

Il lavoro svolto presso FN ha riguardato la realizzazione di componenti con geometrie complesse in SiC/SiC, densificati tramite tecnologia CVI, e diverse attività di contorno per l'ottimizzazione delle procedure sviluppate nelle precedenti annualità [rapporto RdS/PAR2013/215].

Le attività sperimentali si sono concentrate sulla realizzazione di tubi e prismi a sezione quadrata in SiC/SiC, con particolare attenzione sulla procedura di formatura delle preforme. Sono stati progettati e realizzati sistemi di stampo/controstampo e di avvolgimento meccanico delle tele per ottenere le caratteristiche richieste e rendere il processo ripetibile.

In parallelo sono stati condotti studi su deposizione di coating di SiC impermeabile all'idrogeno e collegamento non meccanico tra SiC/SiC e acciaio. Questi studi saranno approfonditi nella successiva annualità e aprono le porte ad una possibile e nuova area di ricerca e sperimentazione.

Compositi a matrice ceramica e tecnologia CVI

FN in collaborazione con ENEA da alcuni anni si occupa dello sviluppo di questi materiali, in particolare di compositi a matrice ceramica (CMC) a fibra lunga in SiC_f/SiC tramite tecnologia CVI, con geometrie sempre più complesse e indagini sul comportamento del materiale in ambienti estremi (esempio effetti delle radiazioni ionizzanti, prove in litio piombo).

I costituenti principali dei compositi ceramici a fibra lunga sono:

- Rinforzo: fibre ceramiche lunghe. Le fibre possono avere diametro di 5-15 µm, sono attorcigliate in fili e ogni filo può contenere 500-3000 fibre; i fili vengono organizzati a costituire dei tessuti generalmente bidimensionali e che possono presentare varie tipologia di tessitura;
- Interfase: film sottile, tipicamente di spessore 0.1-1µm, di un materiale con bassa resistenza al taglio depositato tra fibre e matrice e la cui funzione principale è di arrestare e/o deflettere le microcricche della matrice. Inoltre, l'interfase ha la funzione di trasferire il carico, come in ogni composito rinforzato con fibre, e può agire anche da barriera diffusiva;
- Matrice: materiale ceramico omogeneo in cui è immerso il sistema di fibre del composito.

Nello specifico sono state scelte fibre di carburo di silicio (elevata resistenza a trazione, elevato modulo elastico, buona stabilità termica, maggiore resistenza all'ossidazione ad elevate temperature rispetto alle fibre di carbonio) e in particolare, essendo applicazioni in ambito fusionistico, fibre di terza generazione; esenti da ossigeno e con stabilità termica eccellente.

Le fibre utilizzate per la realizzazione di tubi e prismi sonoTyranno SA grade 3 (SA3), tessuto plain 2D. Prodotte e commercializzate dalla UBE Industries LTD (Giappone), sono fibre di SiC policristallino che contengono piccole quantità di alluminio. In Tabella 92 sono riportate le caratteristiche delle fibre SA3 a confronto con le altre fibre di SiC.

Tabella 92. Principali caratteristiche fibre di SiC

Proprietà		Tipo di fibre			
		S	LoxM	ZMI	SA3
Diametro fibre	[µm)	11 - 8,5	11	11	10-7,5
Numero di fibre per filo	[fil./yarn]	800 - 1600	800	800	800-600
Tex	[g/1000m]	200 - 220	200	200	180-190
Carico di rottura	[GPa]	3,2	3,3	3,4	2,8
Modulo elastico	[GPa]	170	180	190	380
Allungamento a rottura	[%]	1,9	1,8	1,7	0,7
Densità	[g/cm^3]	2,35	2,48	2,48	3,10
Conducibilità termica	[W/mK]	1,0	1,4	2,5	65
Coefficiente di espansione termico	[10^{-6}/K]	3,1 (RT:500°C)	-	4,0 (RT:1000°C)	4,5 (RT:1000°C)
Composizione chimica	[wi%]				
	Si	50	55	56	67
	C	30	32	34	31
	O	18	11	9	<1
	Ti	2	2	-	-
	Zr	-	-	1	-
	Al	-	-	-	<2

Per quanto riguarda la deposizione dell'interfase e della matrice, in entrambi i casi si è adottata la tecnologia Chemical Vapour Infiltration (CVI), in Figura 325 o schema dell'impianto di FN.

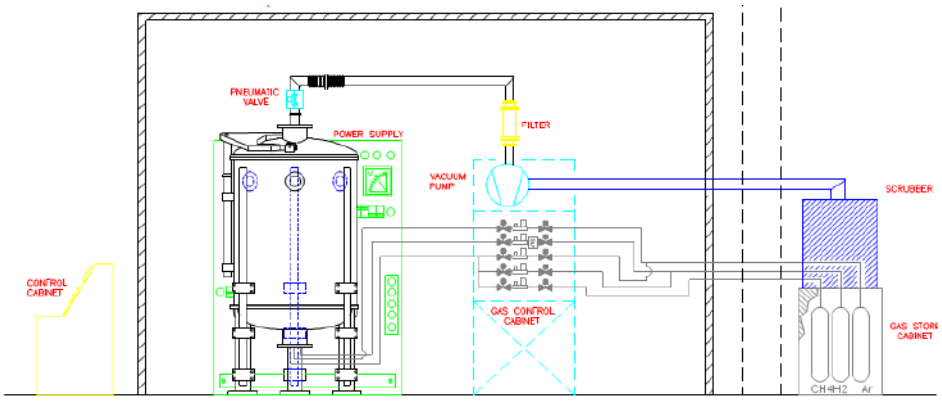


Figura 325. Schema impianto CVI di FN

Il processo CVI sviluppato è isobaro e isotermo e la deposizione dell'interfase e della matrice si ottiene dalla decomposizione di precursori gassosi che penetrano nelle porosità della preforma. La preforma ceramica presenta una complessa distribuzione di pori e in particolare si possono distinguere 3 ordini di grandezza:

- microporosità: presenti tra le fibre intrecciate a costituire un filo (1-10 µm);
- mesoporosità : presenti tra i fili che costituiscono il tessuto (50-500 µm);
- macroporosità: presenti tra i tessuti della preforma (> 500 µm).

Per ottimizzare il processo di deposizione, limitando le porosità residue, bisogna tenere conto che nel processo CVI sono coinvolti due tipi di fenomeni chimico-fisici:

- reazioni chimiche
- trasporti di calore e di massa: i reagenti devono essere trasportati all'interno della preforma e i prodotti gassosi devono essere rimossi insieme ai precursori non reagiti.

Durante il processo i precursori gassosi devono essere trasportati nella zona di reazione dove avviene la decomposizione; i reagenti cosi formatisi devono essere trasportati per diffusione sulla superficie dei campioni e all'interno delle porosità dove avvengono altre reazioni che portano al deposito. Infine i sottoprodotti di reazione e i precursori gassosi devono essere allontanati prima dalla preforma e successivamente dalla camera di reazione perché potrebbero influenzare la cinetica di reazione addirittura inibendola. La velocità di deposizione complessiva è quindi controllata sia dalla cinetica delle reazioni chimiche sia dai fenomeni diffusivi.

L'obiettivo primario è di massimizzare la velocità di reazione, per ridurre tempi e costi del composito, aumentando la temperatura e la pressione. Questo comporta però una diffusione del gas all'interno delle preforme non ottimale e si rischia di avere un deposito maggiore sulla superficie che porta alla formazione di porosità chiuse e gradienti di densità nello campione stesso.

In FN sono stati ottimizzati i processi di deposizione di carbonio pirolitico (interfase) e carburo di silicio (matrice) con le seguenti reazioni:

carbonio:	$CH_4 \longrightarrow C + 2H_2$	T = 1100-1200 °C, P = 10-20 mbar
carburo di silicio:	$CH_3SiCl_3 \longrightarrow SiC + 3HCl$	T= 900-1000 °C, P = 10-20 mbar

In Figura 326 è riportata un immagine SEM su un campione di SiC/SiC per la verifica della presenza e dello spessore dell'interfase. Come si può notare lo spessore è dell'ordine dei 0,2 µm, ossia perfettamente centrato rispetto alle specifiche di riferimento.

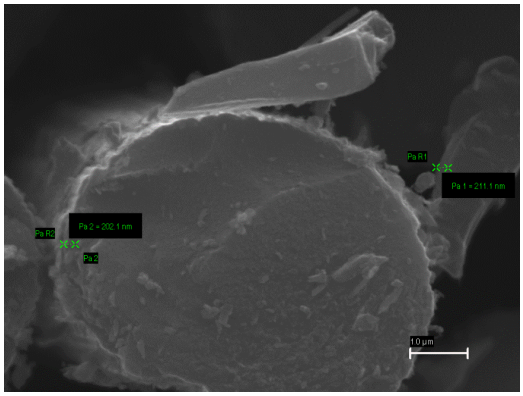


Figura 326.Immagine SEM interfase di carbonio pirolitico, 30kX

Realizzazione tubi in SiC/SiC

L'attività prevede la realizzazione di tubi con le seguenti dimensioni:

- diametro esterno 25 mm, spessore 4 mm lunghezza massima compatibile con gli impianti;
- diametro esterno 35 mm, spessore 4 mm lunghezza massima compatibile con gli impianti;
- diametro esterno 12,5 mm, spessore 2 mm lunghezza 150 mm con tubi in acciaio collegati all'estremità.

Per la realizzazione dei tubi di medio e grosso diametro, FN aveva già sviluppato e definito una procedura operativa per le preforme. Questo processo è manuale e nel corso di questa annualità sono state apportate modifiche per migliorarla in modo tale da avere poi un corretto processo di densificazione. La consiste principalmente in:

- calcolo della fibre necessarie per un determinato spessore e taglio di un'unica striscia
- impregnazione delle fibre con resina fenolica in polvere
- avvolgimento delle fibre sull'anima di grafite realizzata nell'officina interna di FN
- avvolgimento di un nastro di film termoretraibile per dare pressione all'esterno delle fibre durante il trattamento di cura della resina.

In questo modo però il processo di formatura dei tubi non è ripetibile perché la "pressione" è data dall'operatore e nella fase di fissaggio finale del film termoretraibile è possibile che le fibre si allentino e, in alcuni casi, può diventare difficoltosa, se non impossibile, la successiva densificazione. È stato quindi progettato in FN un

controstampo per dare una pressione uniforme e regolata ed avere la ripetibilità su tutte le preforme realizzate. Inoltre, è stato progettato il sistema meccanico di avvolgimento delle tele per una maggiore ripetibilità del processo.

Il nuovo sistema per la formatura dei tubi è costituito da:

- anima di grafite su cui avvolgere i tubi (Figura 327)
- controstampo di grafite (Figura 328)
- staffe di serraggio per mantenere la pressione costante sulla superficie delle tele alla stessa pressione durante il ciclo di cura della resina (Figura 329).

L'anima di grafite è di dimensione maggiore rispetto al tubo per toglierla più facilmente al termine del ciclo di cura e per poter sollevare il tubo durante il trattamento termico di cura della preforma appoggiando le estremità a dei supporti, evitando il formarsi di pieghe o grinze. Nella Figura 330 è riportata la preforma in SiC/SiC per il tubo da 12,5 mm.

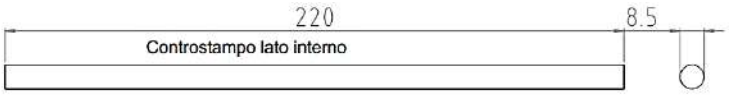


Figura 327. Anima di grafite (dimensioni in mm)

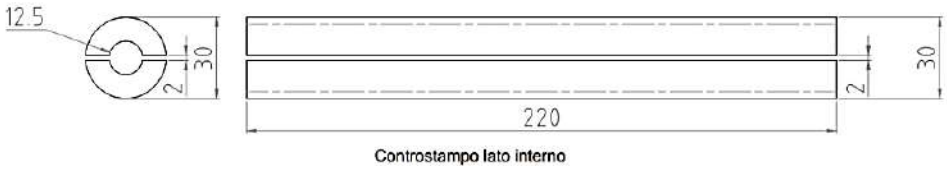


Figura 328. Controstampo di grafite per tubi (dimensioni in mm)

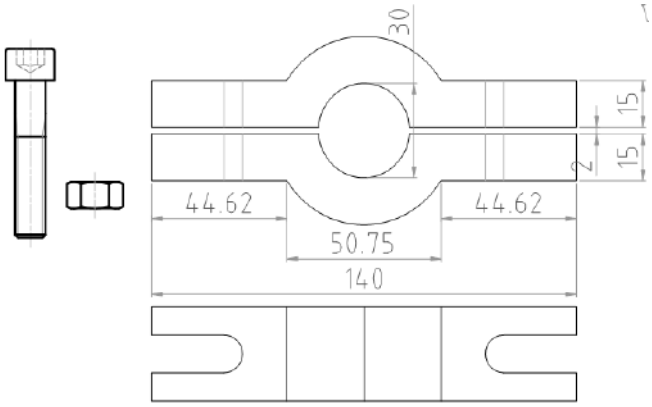


Figura 329. Staffe di serraggio (dimensioni in mm)



Figura 330. Preforma di tubo in SiC/SiC

Sviluppo di tecniche di collegamento di SiC/SiC su matrice di acciaio

Il composito SiC/SiC è un materiale che ha un'elevata stabilità e resistenza meccanica alle alte temperature ma i processi tecnologici per produrlo a livello industriale ed in modo economico permettono di realizzare solo semplici geometrie. Quindi la realizzazione di componenti complessi richiede lo sviluppo di tecniche di giunzione.

Tra i sistemi di giunzione eterogenea attualmente noti c'è il processo di brasatura che è relativamente semplice ed assicura una notevole resistenza meccanica. L'obiettivo del presente studio è di identificare un procedimento in grado di effettuare la giunzione del composito SiC/SiC utilizzando leghe con una temperatura di fusione appropriata per le applicazioni nel campo dell'energia nucleare e dotate di elevata affinità chimica con il carburo di silicio, ed in grado di reagire all'interfaccia con i materiali da giuntare assicurando un'elevata resistenza di giunzione. Tale studio viene rivolto alla giunzione sia di due componenti realizzati in SiC/SiC che alla giunzione di due componenti realizzati in SiC/SiC e acciaio.

Giunzione di due componenti realizzati in SiC/SiC

Per la giunzione di due componenti realizzati in SiC/SiC l'utilizzo di leghe brasanti di argento e rame è stata scartata a causa delle loro basse temperature operative, mentre quelle a base di nichel o di cobalto, pur avendo un'elevata temperatura di utilizzo (1300 °C), formano siliciuri instabili che limitano le prestazioni meccaniche della giunzione. L'utilizzo di leghe basate sul silicio e su metalli di alligazione attivi come titanio e cromo dà la possibilità di avere carburi o siliciuri stabili alle temperature operative della giunzione, che sono pari a circa 1000 - 1200 °C. Tali leghe, usate in polveri basate su formulazioni eutettiche, offrono il vantaggio di avere una temperatura di fusione sensibilmente inferiore a quella degli elementi puri. Le leghe tipicamente utilizzate hanno le seguenti composizioni in peso: (75-78)% Si-(22-25)%Ti, 8%Si-92%Ti e 56%Si-44%Cr. La presenza del silicio assicura un'ottima affinità chimica con il carburo di silicio e la presenza di altri componenti capaci di formare siliciuri stabili con il silicio permette la loro reazione all'interfaccia con il materiale da giuntare. Inoltre, il titanio o il cromo agiscono da elementi attivatori della giunzione, in quanto il titanio forma componenti intermetallici sia con il silicio che con il carbonio, mentre il cromo forma composti intermetallici con il carbonio. L'integrità della giunzione è inoltre assicurata dal fatto che il coefficiente di dilatazione termica delle suddette leghe è dello stesso ordine di grandezza di quello del substrato di carburo di silicio assicurando così un buon comportamento nei confronti della fatica termica. Un esempio di giunzione ottenuta con una lega eutettica di silicio e titanio è mostrata in Figura 331.

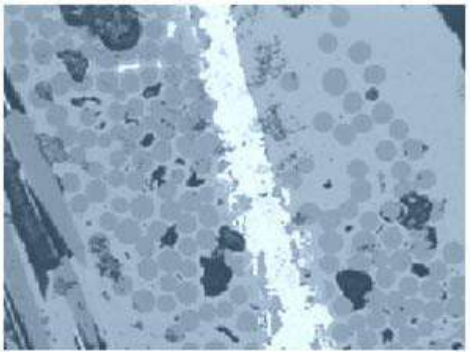


Figura 331. Micrografia di una giunzione di compositi SiC/SiC

Il processo si basa sulla preparazione di una mistura di polveri con percentuale eutettica. Tale mistura va fusa in atmosfera di argon più volte per omogeneizzare la lega. Il materiale va quindi frantumato in un mulino fino ad ottenere una granulometria tra 0.1 e 1 mm. Ottenuta la lega brasante si esegue il ciclo di brasatura in forno ad alto vuoto mediante un ciclo termico che prevede una rampa di riscaldamento, un mantenimento e un raffreddamento controllato fino a temperatura ambiente.

Giunzione di due componenti realizzati in SiC/SiC e acciaio

Anche per la realizzazione di giunzioni tra SiC e acciaio l'uso di leghe brasanti con elementi capaci di attivare la superficie del carburo di silicio, quali Ti e Zr, risulta indispensabile. Le leghe più frequentemente utilizzate sono quelle del tipo AgCuTi (70,5-26,5-3), AgCuInTi (59-27,2-12,5-1.,25) ed SnAgTi (40-58-2). Il processo di brasatura avviene, come nel caso precedente, in forni ad alto vuoto o in atmosfera con gas inerte mediante un opportuno ciclo termico.

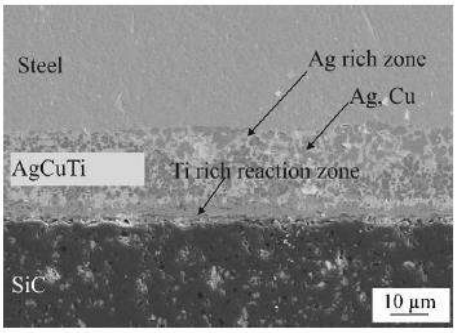


Figura 332. Immagine SEM di una brasatura tra carburo di silicio e acciaio

La giunzione SiC con acciaio ha il problema degli stress residui causati dalle differenti proprietà meccaniche e termiche dei due materiali. Tale fenomeno riduce la resistenza del giunto e può essere ridotto addizionando alla lega brasante elementi quali il rame. Un esempio di giunzione ottenuta con una lega di argento rame e titanio è mostrata in Figura 332.

Importante sul risultato della qualità della brasatura è la preparazione delle superfici da saldare e in particolare la finitura superficiale inoltre anche il ciclo termico, particolarmente nella fase reattiva tra gli elementi della lega brasante e il carburo di silicio, riveste un elemento critico del processo.

Nella Tabella 93 sono riportate le caratteristiche delle leghe brasanti che possono costituire un riferimento per la realizzazione di giunzioni SiC/SiC e acciaio.

Tabella 93. Proprietà delle leghe brasanti

Material/Composition	PLS-SiC	Ag-Cu-Ti 70.5-26.5-3	Ag-Cu-In-Ti 59-27.2-12.5-1.25	Sn-Ag-Ti 30-68-2	Sn-Ag-Ti 40-58-2	Sn-Ag-Ti 50-48-2	Steel Matno. 1.1191
Trade name	EKasic-F	CB 4	Incusil-ABA	30Sn68Ag2Ti	40Sn58Ag2Ti	50Sn48Ag2Ti	C45E
Company	ESK Ceramics	Brazetec	Morgan Chem.	Research Centre Karlsruhe, IMF I* Aesar GmbH, Germany, Ti: Fluka		*Sn, Ag: Alfa	
Average grain/particle size (μm)	1.9			Sn: 11 μm; Ag: 0.6–2 μm; Ti: 380 μm			
Density ρ (g/cm^3)	3.9	9.9	9.7	9.3	9.0	8.7	7.9
Strength σ (MPa)	350	230	338	-	-	-	620
Youngs Modulus E (GPa)	380	72	76	63	61	59	212
Coefficient of thermal expansion CTE (10^{-6}/K)	8.4	18.9	18.2	-	-	-	11.1
Brazing temperature T_{braze} (°C)		900–950	850–900	900–950			

Fonte: I. Südmeyer et al. / Ceramics International 36 (2010) 1083–1090

Realizzazione prismi a sezione quadrata in SiC/SiC

L'attività prevede la realizzazione di un profilato a sezione quadrata di dimensioni 100 mm, spessore 5 mm e lunghezza massima compatibile con gli impianti.

Per la realizzazione dei prismi la procedura è la stessa dei tubi: taglio della striscia di tela della dimensione calcolata per avere lo spessore richiesto (5 mm), impregnazione con resina fenolica in polvere, avvolgimento sull'anima di grafite e successivamente avvolgimento con film termoretraibile. Anche in questo caso si è proceduto con la stessa modifica: il primo prototipo di prisma realizzato nella precedente annualità presentava sulla superficie esterna pieghe dovute alla non corretta tensione applicata alle fibre stesse.

Inoltre essendo un prisma, con angoli, è anche più complicato avvolgere le tele perché si rischia di reciderle in corrispondenza degli spigoli. Per questi motivi è stata modificata l'anima arrotondando gli spigoli vivi ed è stato progettato un sistema di avvolgimento per avere un avvolgimento omogeneo (Figura 333).

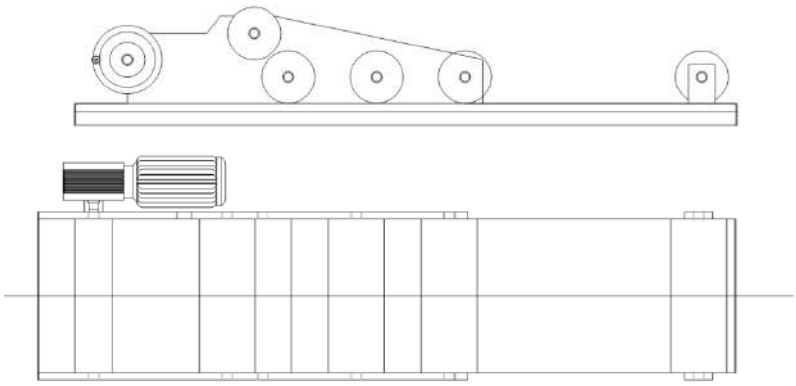


Figura 333. Disegno esecutivo supporto per avvolgimento tele prismi e tubi

Il sistema è dotato di un motore elettrico con riduttore per avere velocità costante; i rulli tenditori hanno una frizione interna per poter registrare il grado di scorrimento. Il sistema si può Implementare con delle tramogge per la distribuzione della resina (attualmente ancora processo manuale). È stato poi progettato un controstampo, di grafite per evitare il rilassamento delle fibre.

Il nuovo sistema per la formatura dei prismi è costituito da:

- anina di grafite su cui avvolgere i tubi;
- controstampo di grafite;
- staffe di serraggio da posizionare nella lunghezza del campione per sottoporre le tele alla stessa pressione durante il ciclo di cura della resina.

Con le prime prove di realizzazione è stato osservato che non sono presenti pieghe e grinze evidenti e i piccoli difetti ancora presenti possono essere eliminati con lavorazioni meccaniche successive (Figura 334).



Figura 334. Preforma prisma in SiC/SiC

Tecniche di collegamento di SiC/SiC su matrice di acciaio

Gli acciai inossidabili sono frequentemente usati per la costruzione di recipienti per l'idrogeno e come materiale per la costruzione di componenti nei reattori a fusione nucleare, dove le perdite di trizio devono essere minimizzate. La diffusione di isotopi dell'idrogeno attraverso gli acciai inossidabili è considerevole portando a problematiche quali: la perdita di isotopi dell'idrogeno quali trizio, la contaminazione radioattiva dei componenti strutturali e l'infragilimento dei materiali.

L'uso del carburo di silicio come materiale di prima parete nei reattori a fusione nucleare, dove sono richiesti materiali con basso numero atomico e con un'alta temperatura di fusione, ha portato a sviluppare tecnologie di deposizione di substrati di detto materiale su acciai inossidabili esplorando la possibilità di realizzare barriere alla permeazione di isotopi dell'idrogeno.

La permeabilità del carburo di silicio risulta inferiore a quella dell'acciaio è possibile quindi pensare all'utilizzo di tecnologie di collegamento dei materiali SiC/SiC con l'acciaio, utilizzando ad esempio leghe brasanti come discusso nel paragrafo riguardante le tecniche di collegamento di SiC/SiC su matrice di acciaio.

Le tecniche utilizzate per depositare il carburo di silicio sono quella della deposizione assistita con fascio ionico e quella della deposizione con utilizzo di radiofrequenza. Gli spessori che si possono aggiungere con le due tecniche variano tra 100 nm e 2,5 µm.

Nella deposizione assistita con fascio ionico si utilizzano più sorgenti ioniche. Una sorgente ionica di argon è utilizzata per bombardare un target di silicio per permettere di depositare silicio sull'acciaio, simultaneamente una seconda sorgente ionica di carbonio bombarda direttamente l'acciaio per depositare e creare una miscela di atomi di silicio e di carbonio sull'acciaio. La pressione nella camera di deposizione è dell'ordine di 0,026 Pa.

Nella deposizione a radiofrequenza si bombarda un target di carburo di silicio con una sorgente a radiofrequenza con pressioni dell'ordine di 0,5 Pa in argon. Il film depositato può venire bombardato con ioni (ad esempio N+) per migliorare l'adesione e migliorarne le proprietà di impermeabilità all'idrogeno.

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

La costruzione di un apparato sperimentale costituito da un forno ad alta temperatura è stata completata. Il forno è stato quindi installato presso i laboratori dell'ENEA di Frascati dove le prove di avviamento e le verifiche di funzionamento hanno avuto luogo (Figura 335). In particolare, utilizzando il software Labview è stato realizzato il sistema di acquisizione dei dati e di controllo del processo.



Figura 335. Forno per prove ad alta temperatura - C.R. ENEA Frascati

Le prove di collaudo sono state condotte nel gennaio 2014 in presenza dei delegati di F4E e di JAEA. Durante il collaudo è stato verificato lo stato di funzionamento del forno e dei suoi principali componenti. Le prove di funzionamento sono state condotte in accordo alla procedura stabilita in precedenti incontri con F4E e JAEA (ciclo termico, rotazione del campione, sistema di acquisizione e controllo, intervento degli allarmi, ecc.); la Figura 336 riporta il grafico del ciclo termico realizzato durante le prove di collaudo. Dopo

queste prove è stato eseguito il controllo dei componenti interni al forno verificandone l'integrità e l'assenza di difetti.

Dopo le prove di collaudo, l'apparato sperimentale è stato imballato secondo le prescrizioni del trasporto aereo (scatole in legno trattato, presenza di sensori di urto e capovolgimento, ecc.).

Altre attività hanno riguardato la stesura del Manuale di Installazione e del Manuale Operativo e la missione dei ricercatori ENEA presso il centro di Rokkasho per il supporto all'avviamento dell'apparato sperimentale.

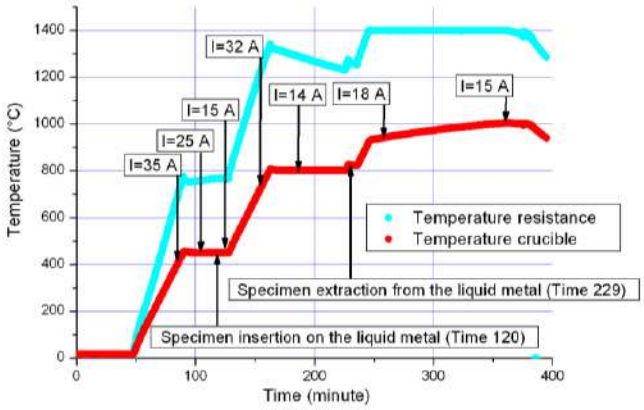


Figura 336. Ciclo termico eseguito durante le prove di collaudo

d. FAST il nuovo esperimento satellite europeo

d.1 Analisi del problema del power exhaust e del suo smaltimento su componenti metallici in EAST basato su soluzioni FAST-like, in vista della sua applicazione a JT60-SA

Il problema del "Power Exhaust", ovvero della potenza termica da smaltire nel divertore, rappresenta il maggiore e più impegnativo divario tecnologico da colmare, nella "Fusion Roadmap", prima di poter iniziare a realizzare un impianto di potenza dimostrativo. Questa ricerca evidenzia che le soluzioni al momento previste, da sole, non saranno in grado di ridurre il flusso termico del divertore fino al livello QDIV ≈ 15 MW m^{-2}, compatibile con il miglior materiale attualmente disponibile per realizzare queste tegole, ossia i monoblocchi di tungsteno raffreddati attivamente (Figura 337). La soluzione attualmente prevista, basata sull'aumento delle perdite da radiazione mediante l'iniezione di impurezze, permette di ridurre la potenza da dissipare sul divertore fino al valore desiderato, ma a spese di un forte degrado delle proprietà di trasporto del centro del plasma e quindi di una riduzione delle prestazioni complessive date dal guadagno di fusione Q. L'altra strategia che è stata proposta, basata sulla ricerca di una topologia magnetica locale con una elevata espansione di flusso, permette di ridurre il flusso di potenza totale di un fattore 2 ÷ 3, invece del necessario fattore ≈ 10.



Figura 337. Prototipo di un elemento basato su monoblocchi di tungsteno raffreddati attivamente

Solo la sinergia tra l'aumento delle perdite di radiazione e il controllo della topologia magnetica può permettere di ridurre il flusso di potenza a valori sostenibili dai bersagli del divertore, e solo nuovi esperimenti possono permettere di studiare e possibilmente risolvere il problema integrato del "Power Exhaust". La proposta di macchina sperimentale FAST è stata progettata con l'obiettivo principale di studiare tutti i problemi integrati connessi con il "Power Exhaust". Sia FAST (Figura 338a) che JT60-SA soddisfano tutte le caratteristiche richieste per il bordo del plasma (grande densità di potenza e possibilità di provare diverse soluzioni per il divertore) e per il centro del plasma (parametri adimensionali vicino a quelli di DEMO e di ITER).

Comunque l'attuale tokamak cinese EAST (Figura 338) ha già tutte le principali caratteristiche del divertore (divertore in tungsteno raffreddato attivamente e grande flusso di potenza sui bersagli, fino a 20 MW/m^2), che saranno presenti nel futuro DEMO, anche se manca la necessaria integrazione tra bordo e centro del plasma. EAST

è quindi, tra gli impianti attualmente in funzione, il più adatto a studiare il problema del "Power Exhaust" in scenari integrati di bordo e centro del plasma ed ad indirizzare gli indispensabili esperimenti futuri su FAST e JT60-SA. In questo lavoro viene quindi analizzata quantitativamente la possibilità di utilizzare, in un futuro DEMO, scenari con elevate perdite per radiazione e viene proposta l'integrazione tra questi scenari e le nuove configurazioni magnetiche.

Per maggiori informazioni su questo argomento si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/219.

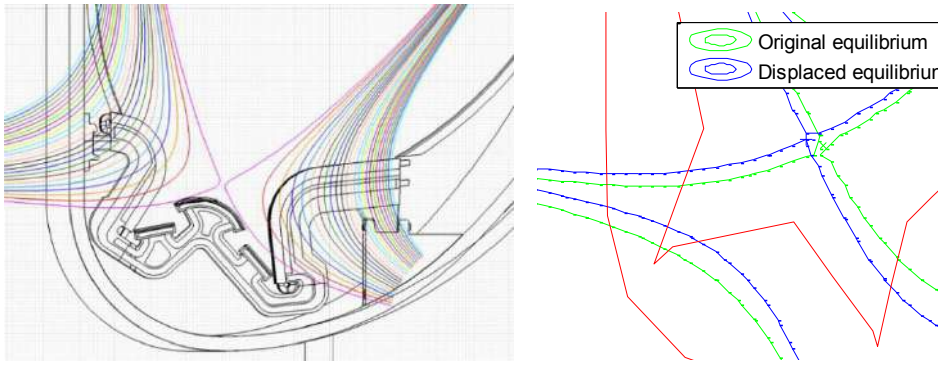


Figura 338. a) equilibrio di plasma Quasi Snow Flake (QSF) per FAST, con il divertore appositamente progettato per questa configurazione; b) equilibrio QSF per EAST, con evidenziata la flessibilità disponibile per il controllo delle linee di flusso sul divertore, indipendentemente dal bordo del plasma

Sviluppo della configurazione di plasma di tipo "Snow-Flake" FAST-like per EAST

I flussi di calore e particelle cariche sui componenti affacciati al plasma sono i problemi più impegnativi da risolvere nella progettazione del reattore. La configurazione magnetica alternativa del divertore "Quasi Snow-Flake" (QSF) può permettere il funzionamento del tokamak con valori inferiori di carico termico massimo rispetto alla configurazione standard con divertore a Singolo Nullo (SN). Questa configurazione magnetica del divertore è stata studiata e proposta recentemente per il tokamak FAST e per il reattore dimostrativo di potenza DEMO.

Nel rapporto RdS/PAR2013/220 è illustrata la progettazione e la realizzazione di una configurazione QSF per il tokamak EAST (Figura 339). A differenza di quanto previsto su FAST e DEMO, EAST non ha bobine di campo poloidale ottimizzate per realizzare tale configurazione. Una configurazione QSF è stata progettata con bobine esistenti, anche se a corrente di plasma più bassa del massimo raggiungibile in EAST. La configurazione QSF è stata ottimizzata con il codice CREATE-NL e quindi provata sperimentalmente su EAST. I primi risultati sperimentali confermano le proprietà geometriche del divertore della configurazione QSF simulata e la predizione che la presenza di un secondo punto di nullo nella configurazione QSF riduce il campo poloidale locale nella regione della separatrice del divertore e ciò incrementa la lunghezza di connessione di ~30% e l'espansione di flusso nella regione del nullo esterno di un fattore ~5. Questi primi esperimenti indicano anche che in futuro la corrente di plasma potrebbe essere aumentata e la distanza fra i due punti di nullo nella configurazione QSF potrebbe essere ulteriormente diminuita per investigare a quale distanza il QSF diventa uno SF esatto in termini delle proprietà di smaltimento di potenza termica.

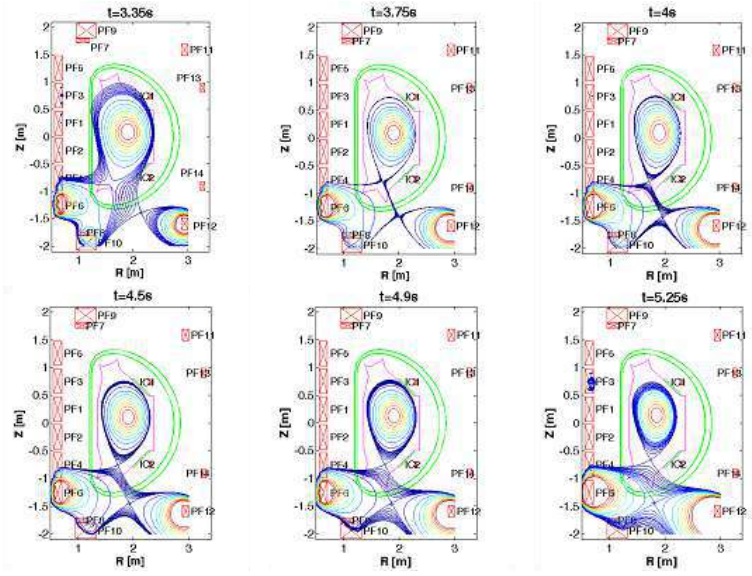


Figura 339. Sequenza delle configurazioni di plasma in EAST ricostruite con EFIT per la scarica ohmica QSF #47660 da 3.35 a 5.25 s

In fine, simulazioni predittive di bordo, usando il codice TECXY, hanno evidenziato i vantaggi in termini di potenza termica sul

divertore, attesi dal cambiamento della configurazione magnetica del divertore dal singolo nullo alla configurazione "Snow Flake". La riduzione del carico termico apparentemente migliora alle più alte densità, in accordo a quanto riportato in letteratura, ed è particolarmente evidente con elevata potenza di riscaldamento addizionale. Queste simulazioni sono state anche confrontate con i risultati sperimentali dei carichi termici sulle tegole del divertore.

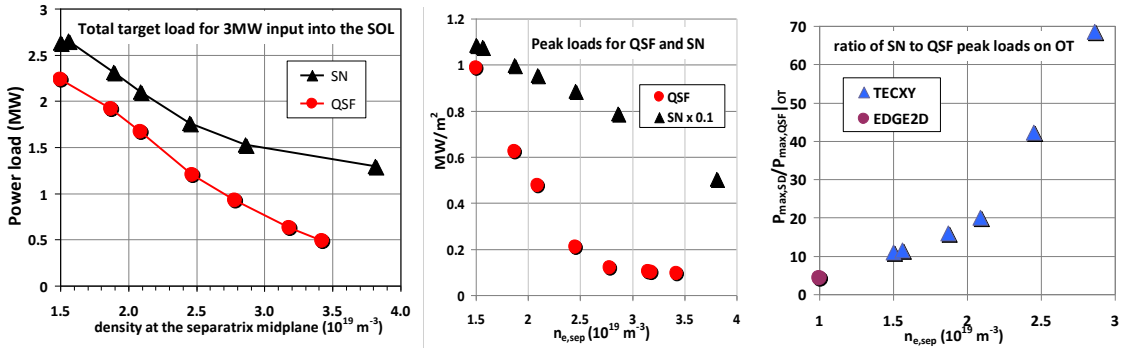


Figura 340, a) Carico totale su entrambi i target in funzione della densità di plasma all'esterno del piano medio, con 3 MW di potenza in ingresso nel SOL per i divertori a singolo nullo standard (SN) e "quasi snow flake" (QSF); b)Potenza termica di picco sul target esterno in funzione della densità di plasma all'esterno del piano medio per i divertori SN e QSF; c) Fattore di riduzione di picco per il divertore QSF, come calcolato da TECXY e EDGE2D

d.2 Studio preliminare delle soluzioni di sostituzione da remoto del divertore e della prima parete in EAST, basato su soluzioni FAST-like

Il Tokamak satellite è concepito con lo scopo principale di sviluppare tecnologie nuove o alternative per ITER e DEMO, in grado di contribuire a risolvere le questioni più cruciali circa il funzionamento del plasma. In particolare, grande attenzione deve essere rivolta alla progettazione di componenti affacciati direttamente al plasma, come prima parete (FW) e divertore, per ragioni di movimentazione remota e carichi termo-strutturali. In questo senso, assume grande importanza la progettazione della prima parete dell'impianto a fusione denominato FAST, i cui parametri di operazione sono vicini a quelli di ITER. La strategia di progettazione della prima parete, si basa su una serie di scelte progettuali innovative e soluzioni meccaniche legate alle caratteristiche dell'interfaccia con il plasma.

I punti chiave sui quali si basano tali scelte progettuali, possono essere riassunte dai seguenti punti:

1. la prima parete è dotata di una superficie toroidale quasi uniforme, ottenuta attraverso un fascio di tubi a sezione quadrata, e provvisti di ali laterali di estensione variabile;
2. la prima parete è suddivisa in moduli opportuni per consentire la movimentazione remota (Figura 341);
3. il ciclo di raffreddamento è realizzato da opportuni tubi coassiali, ricavati da lavorazioni meccaniche e integrati nella prima parete stessa;
4. i collettori, realizzati per alimentazione multipla o zona di inversione di flusso, contribuiscono a supportare il sistema di refrigerazione e la stabilità strutturale dell'elemento di prima parete;
5. una costola ausiliaria è saldata sulla superficie esterna del modulo della prima parete per consentire le operazioni di montaggio/smontaggio;
6. le operazioni di fissaggio del segmento esterno di prima parete nel relativo supporto meccanico sono previste in accordo ai principi di plug/socket;
7. Il supporto interno della prima parete è integrato nella prima camera da vuoto;
8. la procedura di manutenzione remota della prima parete, compreso il progetto di concetto di un Sistema di RH (Figura 342).

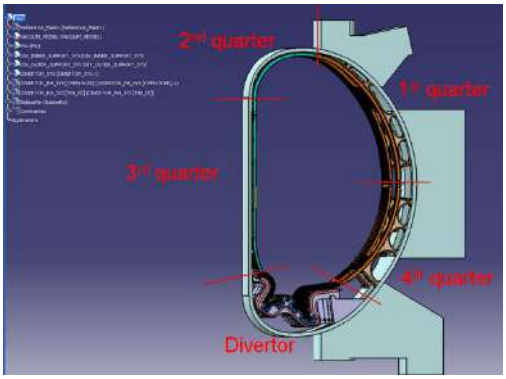


Figura 341. Quattro quarti del tokamak FAST

Gli studi eseguiti in questa attività di ricerca possono essere facilmente adattati al tokamak EAST. Infatti la macchina EAST ha dimensioni quasi simili a quelle di FAST. I differenti materiali che costituiscono la prima parete (in corso di studio l'applicazione di tegole di grafite ricoperte in SiC) richiederanno analisi strutturali e cinematiche

simili per definire la tipologia del braccio robotico da usare per le operazioni di RH. Le attività svolte sono descritte nel rapporto RdS/PAR2013/221.

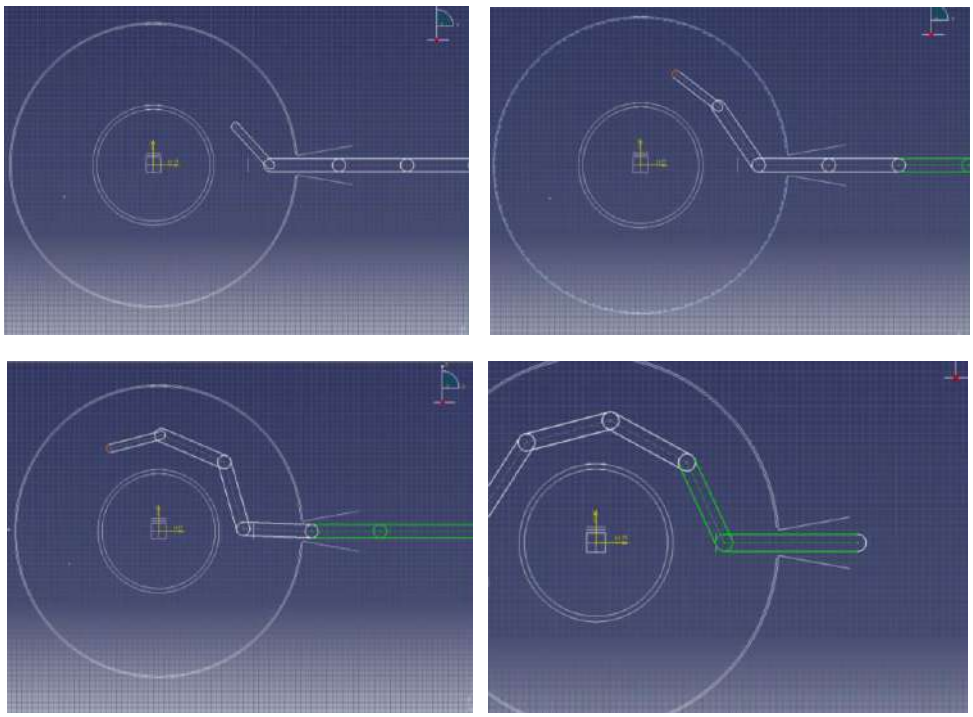


Figura 342. Rappresentazione schematica del RH della prima parete di FAST

Il divertore è un componente essenziale nelle machine Tokamak, con il compito di smaltire il flusso termico e il flusso di particelle proveniente dal plasma durante l'impulso. Nel rapporto RdS/PAR2013/222 si riporta l'attività sul processo di ottimizzazione del progetto concettuale del divertore di FAST, per soddisfare i requisiti termo meccanici e garantire la compatibilità con la movimentazione remota il layout finale del divertore è stato scelto fra differenti soluzioni proposte e analizzate nell'ambito della teoria del "inventive Problem Solving". Il progetto è supportato da simulazioni cinematiche eseguite da un Mock-Up digitale costruito su software CATIA. Significative analisi elettromagnetiche e meccaniche ed iterazioni CAD hanno permesso la progettazione finale degli elementi del divertore, a partire da un primo dimensionamento di massima dettato dai carichi elettromagnetici.

Nella versione finale qui presentata, la cassetta del divertore sostiene un set di tegole di tungsteno con raffreddamento attivo (Figura 343) che costituisce il target verticale interno ed esterno, che si affaccia al plasma e smaltisce la parte principale di flusso di calore. Le tegole di tungsteno sono assemblate considerando un gap minimo di tolleranza (0,1÷0,5mm) che deve essere obbligatoriamente rispettato. I canali di refrigerazione sono stati ridimensionati per ottimizzare la geometria e il layout del volume di refrigerante all'interno della cassetta e migliorare l'efficienza generale.

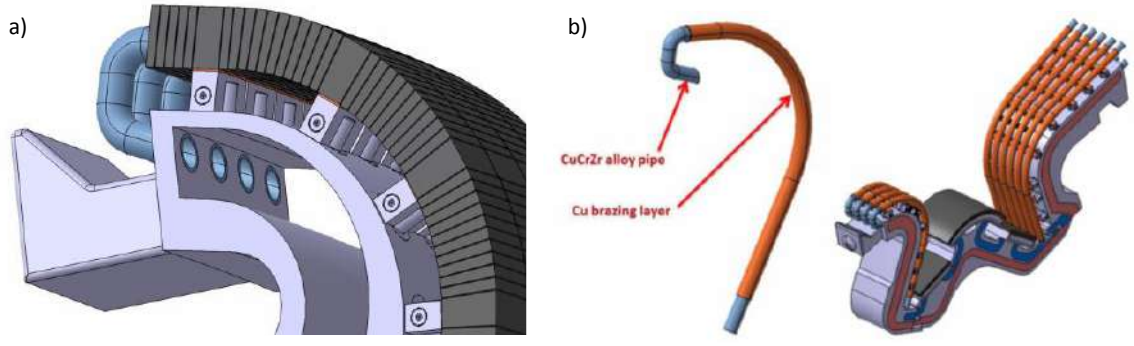


Figura 343. Cassette del divertore di FAST con tubi di ingresso (a) e il layout del nuovo circuito di raffreddamento (b)

Il divertore di FAST è ora caratterizzato da parametri più affidabili e funzionali. La configurazione di ITER è ancor meglio approssimata e FAST continuerà ad essere una buona base di studio nell'ambito della comprensione dei plasma nei tokamak, con particolare riferimento a EAST (Figura 344) e ITER, in vista di DEMO.

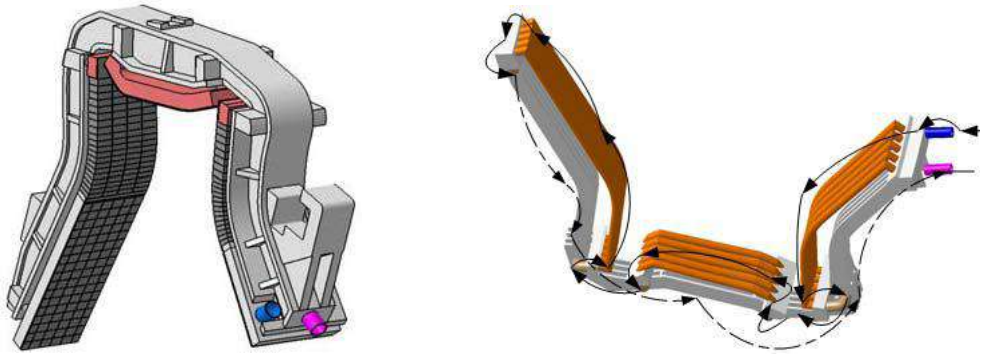


Figura 344. Divertore in tungsten di EAST e il suo sistema di canali di refrigerazione

e. Diffusione dei risultati

L'attività di progetto e di realizzazione si svolge nell'ambito del programma scientifico Broader Approach che riunisce partner internazionali per la progettazione della macchina Tokamak JT-60SA e lo sviluppo delle attività di IFMIF e IFERC.

La diffusione dei risultati delle attività della realizzazione del sistema magnetico toroidale della macchina Tokamak JT-60SA, è stata effettuata a livello europeo con meeting settimanali (Magnet Integration Group meeting MIG-meeting), e con frequenza trimestrale, in ambito internazionale durante i Technical Coordination Meeting (TCM), con la partecipazione delle associazioni giapponese (JAEA) ed europee. In particolare nel periodo di riferimento si sono tenuti:

- TCM-18 a Naka, Giappone 23-24 Ottobre 2013
- TCM-19 a Garching, Germania, 26-27 Febbraio 2014
- TCM-20 a Naka, Giappone 4-5 Giugno 2014

Come previsto i risultati dell'attività sono stati inoltre disseminati, attraverso contributi presentati alle principali conferenze e meeting internazionali sulla fusione e attraverso pubblicazioni di articoli su riviste scientifiche.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Le attività di progettazione e realizzazione sono state condotte in collaborazione con organizzazioni universitarie e con le seguenti ditte:

- **ASG** di Genova esegue la realizzazione delle bobine
- **Walter Tosto** di Chieti esegue la realizzazione delle casse di contenimento.
- **OCEM-ET**, di San Giorgio di Piano (BO) esegue la realizzazione degli SNU.
- **POSEICO-JEMA** in ATI, di Busalla (GE) esegue la realizzazione dei SCMPS.
- **BREDA** di Milano, ha eseguito prove sul materiale forgiato.
- **Università di Palermo** ha eseguito l'analisi termomeccanica del target assembly di IFMIF con backplate a baionetta completo della struttura di supporto.
- **Università di Pisa** ha eseguito Analisi strutturale del bersaglio rotante di una sorgente neutronica D-T per irraggiamento di materiali per reattori a fusione.
- **Università di Firenze** ha eseguito l'ottimizzazione della metodica di analisi cromatografica di soluzioni acquose di ione Ammonio e determinazione quantitativa su campioni ottenuti dalla reazione Litio-Acqua, nell'ambito del progetto IFMIF.
- **Evidence srl** di Giuliano Termo (PI) ha realizzato tutto il software di controllo dell'impianto LIFUS 6 incluso lo sviluppo del software per le procedure di sicurezza.

- **Azzini Claudio SNC**, di Baragazza (BO) ha realizzato gli armadi di controllo dell'impianto LIFUS6.
- **SO.EL Automazioni SAS** di Argelato (BO) ha realizzato i quadri di alimentazione dell'impianto lavaggio componenti;
- **SCIE** di Castello D'Argile (BO) ha realizzato l'impianto di lavaggio dei componenti e/o campioni esposti al litio.
- Il **consorzio CREATE** di Napoli ha realizzato la simulazione grafiche di tutte le operazioni di manutenzione del target di IFMIF;
- **Telerobot SpA** di Genova ha realizzato i dispositivi robotici utilizzati per l'esecuzione delle prove di manutenzione remotizzata.

FN S.p.A Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati

L'attività di ricerca svolta da FN S.p.A., inserita nell'obiettivo c, ha riguardato la "Realizzazione e caratterizzazione di materiali in SiCf/SiC da utilizzare come componenti funzionali e strutturali". FN sotto la supervisione di ENEA ha realizzato componenti con geometrie complesse in SiC/SiC, densificati tramite tecnologia CVI, e attività tese all'ottimizzazione delle procedure sviluppate nelle precedenti annualità. Le attività sperimentali si sono concentrate sulla realizzazione di tubi e prismi a sezione quadrata in SiC/SiC, con particolare attenzione sulla procedura di formatura delle preforme. Sono stati progettati e realizzati sistemi di stampo/controstampo e di avvolgimento meccanico delle tele per ottenere le caratteristiche richieste e rendere il processo ripetibile.

Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Il Piano d'Azione Europeo per l'Efficienza Energetica 2011 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 CO_2.

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 nello stesso tempo permettano di orientare i comportamenti dei consumatori e/o utenti finali verso un uso razionale dell'energia in modo da ridurre il consumo di energia attraverso l'acquisto consapevole e informato di prodotti e servizi efficienti prima e il loro corretto uso poi.

In tale senso l'efficienza energetica, intesa nel suo più ampio senso di riduzione del consumo di energia a parità di servizio che 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. Il Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica restituisce l'immagine di un Paese che mostra segnali significativi di un nuovo approccio strategico al risparmio energetico, come testimonia l'entità del risparmio conseguito a fine 2012 (circa 74000 GWh/anno) corrispondente a circa il 60% dell'obiettivo da raggiungere. Nonostante ciò esiste ancora una significativa possibilità di miglioramento dell'efficienza e di risparmio energetico specialmente in alcuni settori.

Le barriere che ostacolano lo sfruttamento di questo potenziale includono: una carente attività di informazione e formazione verso tutti gli *stakeholder* (PA, aziende e cittadini), con riferimento ai benefici ottenibili con interventi di efficientamento del parco di beni e servizi; difficoltà di accesso al capitale per l'investimento iniziale necessario, la percezione di un rischio elevato dell'investimento e la mancanza di strumenti e dati sul ritorno economico dell'investimento stesso e, infine, la piccola dimensione dei progetti associata ad alti costi di transazione.

Il superamento delle barriere esistenti richiede che si verifichino una serie di condizioni: attività di RS&D sulle tecnologie energetiche innovative/non mature al fine di favorirne una più rapida introduzione sul mercato; l'esistenza di un bilanciato mix di regole e incentivi per le politiche di efficienza energetica; efficaci azioni di formazione, informazione, sensibilizzazione per promuovere comportamenti energeticamente consapevoli; la messa a punto di semplici strumenti di valutazione dei benefici economici energetici/ambientali degli interventi effettuati, un quadro legislativo certo e stabile nel medio periodo indispensabile per attrarre gli investimenti.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale dell'attività consiste nello sviluppo di strumenti e metodi, che mirano al miglioramento di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di stimolare nel mercato la circolazione di prodotti più efficienti.

Poiché il panorama degli stakeholder è piuttosto complesso e caratterizzato da diverse tipologie le attività sono state suddivisi in cinque linee di attività principali, che si articolano a loro volta in differenti obiettivi.

a. Reti di poligenerazione
b. Gestione ottimale reti di edifici
c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione
d. Tecnologie per l'industria del freddo
e. Comunicazione e diffusione dei risultati.

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 e consapevolezza verso l'efficienza energetica e la sua diffusione capillare. E' da evidenziare che, la disponibilità di poter accedere e utilizzare informazioni e soluzioni tecnologiche per l'efficienza energetica, è un fattore di cui beneficia il sistema Paese, in generale, e l'utente finale, in particolare.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Reti di poligenerazione

a.1 Sviluppo di indici per la valutazione delle prestazioni di reti energetiche in assetto poligenerativo e caratterizzazione mediante tali indici di varie topologie di reti reali e simulate mediante codici di calcolo dinamici

Il presente obiettivo nasce dall'esigenza, emersa nella scorsa annualità, di disporre di indici per valutare le prestazioni di una rete in assetto di teleriscaldamento e teleraffrescamento in cui la richiesta termica è soddisfatta con sistemi a fonte fossile e rinnovabile.

In particolare, tale attività è stata svolta in collaborazione con il Politecnico di Torino, Dipartimento Energia, che si è occupato dell'analisi degli indici presenti in letteratura scientifica e della scelta di quelli più significativi e più utili all'obiettivo prefissato; il Politecnico ha, inoltre, valutato la bontà di tali indici applicandoli ai consumi energetici di una rete di teleriscaldamento ubicata nella zona sud di Torino e ha progettato il sistema di monitoraggio energetico remoto della stessa rete che sarà installato e messo in funzione nel corso della prossima annualità.

L'attività ENEA relativa agli indici di prestazione ha riguardato l'implementazione degli stessi nella piattaforma software e la realizzazione di una campagna di simulazioni per valutarne la robustezza e l'applicabilità in varie configurazioni di rete. Inoltre è stata ampliato il modulo di generazione termica della piattaforma con l'introduzione di più sistemi a fonte rinnovabile ed è stata effettuata un'analisi exergetica delle configurazioni della rete proposte che ha evidenziato come tale approccio si sia rivelato idoneo a rilevare aspetti prestazionali legati alla qualità del calore fornito e richiesto dall'utenza che l'approccio energetico (indici prestazionali) non consente altrettanto chiaramente.

Con questa attività ci si è dotati di indicatori che possano permettere un esame più approfondito delle prestazioni termiche di una rete energetica e per poter così valutare non solo il raggiungimento dell'obiettivo della rete (comfort termico delle utenze) ma anche nella fase preliminare di progettazione la scelta della configurazione impiantistica ottimale o la strategia di gestione migliore per una rete esistente.

Si precisa che l'obiettivo finale di questa attività non è quello di fornire indicazioni generali sulle configurazioni di rete energetiche più efficienti o su come ottimizzare la gestione di una rete esistente, ma di mettere a punto degli indicatori, per cui le configurazioni simulate e i risultati prodotti hanno l'unico scopo di validare tali indicatori.

Aggiornamento modello di simulazione delle reti

Per poter effettuare le simulazioni necessarie a mettere a punto gli algoritmi per il calcolo degli indici di prestazione si è reso necessario aggiornare la piattaforma software per ridurre i tempi di calcolo necessari alla simulazione annuale. Tale esigenza acquista maggiore importanza nell'ottica di simulare e valutare le prestazioni di una rete con un elevato numero di utenze.

Il lavoro è consistito nell'esame dei componenti più critici dal punto di vista computazionale e nella valutazione dell'errore indotto dalla loro sostituzione con modelli più "semplici". Alla fine di questo processo sono stati ricostruiti i modelli dei componenti di emissione (ventilconvettori e radiatori) creando, a partire dal modello originario, delle look up table funzioni dei parametri che maggiormente ne influenzano il comportamento: temperatura acqua e aria in ingresso al componente. Questa soluzione ha comportato una riduzione del tempo di simulazione di circa l'85% e un errore nelle prestazioni della rete trascurabile (nel caso peggiore è pari al 3,76%), come evidenzia la Tabella 94.

È importante sottolineare che questa semplificazione del modello di distribuzione ha implicazioni non solo sul peso computazionale dell'edificio, ma anche sulla semplificazione dei parametri che dovrà fornire l'utente; infatti con l'utilizzo delle look-up table serviranno solamente il numero di componenti di emissione utilizzati e la portata del circuito di distribuzione, a fronte delle decine di parametri necessari al modello completo (per molti dei quali non risulta facile modificare il valore rispetto a quello di riferimento e per questo mantenuti costanti).

Tabella 94. Valutazione errore del modello semplificato con look up table

SCENARIO CENTRALIZZATO					
		EDIFICIO COMMERCIALE			
		MOD, ORIGINALE	MOD, DISTRIBUZIONE, SEMPL,	DIFFERENZA	DIFFERENZA [%]
Funzionamento invernale	En_edificio [kWh]	28405	27550	855	3,01%
	En_impianto [kWh]	29411	28457	954	3,24%
Funzionamento estivo	En_edificio [kWh]	52409	54382	-1973	-3,76%
	En_impianto [kWh]	52625	54582	-1957	-3,72%
Consumi totali [kWh]		82036	83039		

SCENARIO CENTRALIZZATO					
		EDIFICIO UFFICI			
		MOD, ORIGINALE	MOD, DISTRIBUZIONE, SEMPL,	DIFFERENZA	DIFFERENZA [%]
Funzionamento invernale	En_edificio [kWh]	6469	6433	36	0,56%
	En_impianto [kWh]	7056	7011	45	0,64%
Funzionamento estivo	En_edificio [kWh]	17272	17864	-592	-3,43%
	En_impianto [kWh]	17387	17976	-589	-3,39%
Consumi totali [kWh]		24443	24987		

SCENARIO CENTRALIZZATO					
		EDIFICIO RESIDENZIALE			
		MOD, ORIGINALE	MOD, DISTRIBUZIONE, SEMPL,	DIFFERENZA	DIFFERENZA [%]
Funzionamento invernale	En_edificio [kWh]	5988	6148	-160	-2,67%
	En_impianto [kWh]	6255	6438	-183	-2,93%
Funzionamento estivo	En_edificio [kWh]	8297	8364	-67	-0,81%
	En_impianto [kWh]	8357	8423	-66	-0,79%
Consumi totali [kWh]		14612	14861		

La sezione di generazione della piattaforma software è stata aggiornata con l'introduzione di un campo solare e di un modulo per la simulazione del calore proveniente da scarti industriali che possono funzionare in parallelo e in serie con i sistemi a fonte fossile già presenti (cogeneratore a MCI e a turbina, pompe di calore, caldaia).

Ciò ha comportato la ridefinizione della configurazione di rete per la parte di distribuzione del fluido termovettore "freddo" in quanto è stato introdotto nella configurazione centralizzata un accumulo-collettore (la cui regolazione e gestione si è rivelata alquanto complessa) che ha la funzione di raccogliere i contributi termici "caldi" degli impianti di generazione attivati nella stagione estiva e alimentare l'unica macchina ad assorbimento.

È stato anche implementato il modello di pannello radiante (Figura 345), fondamentale per poter simulare configurazioni di reti energetiche a bassa temperatura e oggi molto impiegato in contesti di generazione termica

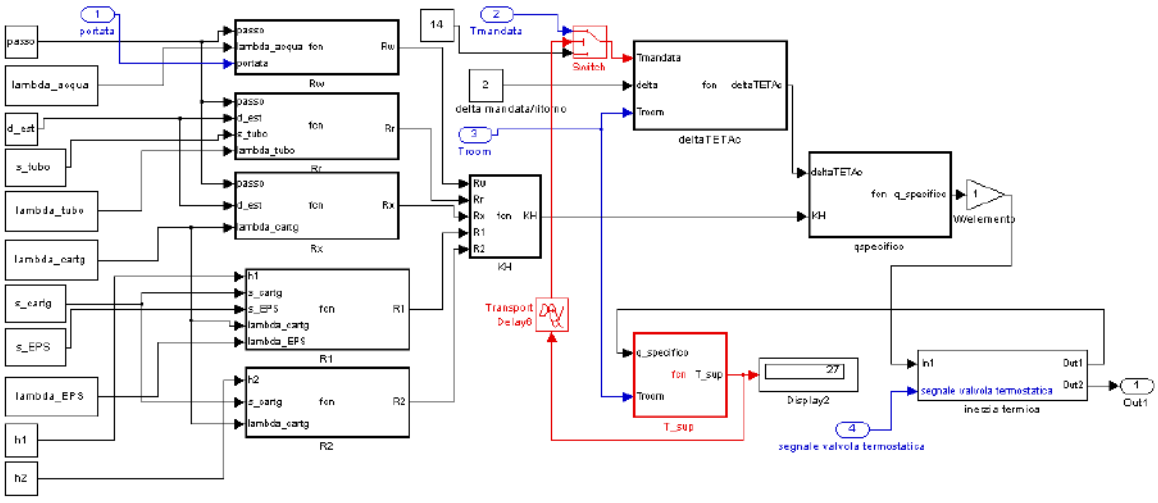


Figura 345. Modello impianto radiante

distribuita. Il modello è stato sviluppato seguendo il metodo contenuto nella normativa di riferimento UNI 15377-1, in particolare si è fatto riferimento al caso relativo al sistema a tubi capillari. Per validare il modello costruito sono state effettuate diverse simulazioni alimentando i pannelli a diverse temperature, in modo da ottenere la curva di resa e confrontarla con quelle reali (fornite dai costruttori). Il confronto riportato in Figura 346 evidenzia come il modello costruito simuli in modo soddisfacente il sistema radiante in funzione della temperatura di alimentazione tra 13 e 16 °C circa; fuori da questo intervallo la resa dell'impianto simulato differisce da quella reale in modo maggiore all'aumentare della temperatura di alimentazione, ma con un errore comunque accettabile

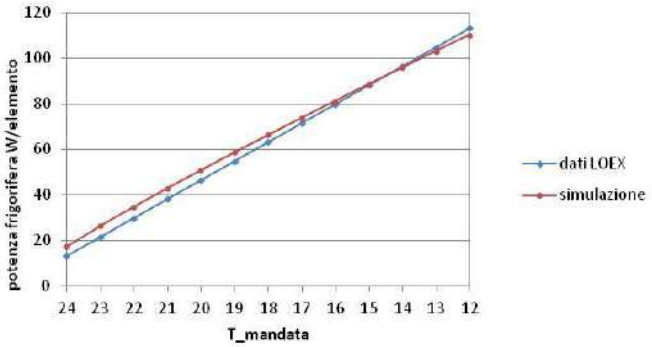


Figura 346. Confronto tra la resa dell'impianto reale e quella simulata

Indici di prestazione

Obiettivo di questa parte di attività è la messa a punto nella piattaforma di simulazione sviluppata di indicatori che forniscano informazioni sulle prestazioni della rete (sia a livello di consumi energetici, sia riguardo ai flussi di potenza scambiati in ogni istante di simulazione) per varie configurazioni di rete energetiche e, soprattutto, in presenza di impianti di generazione a fonte rinnovabile.

Come già anticipato nell'introduzione, gli indici prestazionali sviluppati nell'attività svolta dal Politecnico di Torino sono stati implementati nella piattaforma e opportunamente modificati in modo da diventare indicatori dello stato prestazionale della rete, non solo relativamente ai consumi energetici complessivi (come nella loro formulazione originaria) ma anche relativamente all'evoluzione temporale (annuale) della simulazione.

In particolare gli indici considerati (per la cui spiegazione dettagliata si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/056 del Politecnico di Torino) sono di seguito elencati, specificandone sinteticamente l'informazione fornita:

- Total primary energy factors (PEF): produzione della centrale termica;
- Non renewable primary energy factors (PEF_{NR}): produzione della centrale termica non considerando l'apporto delle fonti rinnovabili;
- District heating global efficiency (η_{Dh}): prestazione della sola rete di distribuzione;
- Relative importance of losses (Ril): perdite termiche di rete;

Tali indici sono stati implementati nella versione della piattaforma con 3 edifici in configurazione generazione termica e frigorifera centralizzata (CEN) e generazione frigorifera distribuita presso le utenze (DIS); tale scelta è dovuta alla volontà di confrontare i nuovi indici di prestazione proposti con quelli utilizzati nell'attività dell'anno precedente; il confronto ha permesso di dimostrare come tali nuovi indici si siano rivelati idonei a superare i limiti evidenziati da quelli precedenti quando è presente generazione termica da fonte rinnovabile.

La Tabella 95 riassume i risultati delle simulazioni effettuate per la località di Roma. Si precisa che fra gli indici usati nell'attività della scorsa annualità, è stato riproposto il rendimento di primo principio (RPP). Appare subito evidente come nelle condizioni in cui le fonti rinnovabili hanno un peso significativo l'RPP perde significato assumendo valore superiore all'unità: in entrambe le configurazioni simulate per percentuale di potenza installata con fonte rinnovabile superiore al 30% l'RPP è maggiore di 1 (caselle evidenziate in arancio). Nelle stesse condizioni, nessuno dei nuovi indici incorre, invece, in errore. Inoltre è possibile rilevare come all'aumentare della componente rinnovabile decresce l'efficienza del sistema di generazione a fonte fossile perché funziona maggiormente in parzializzazione (PEF_{NR}), mentre risulta migliore l'utilizzo dell'energia primaria (PEF); la rete, come si poteva intuire, rimane sostanzialmente insensibile alle variazioni della tipologia di generazione termica (η_{Dh} e Ril) in quanto non è stata variata né la potenza totale installata né la gestione della stessa.

Tabella 95. Indici di prestazione

	PEF	PEF NR	EFF	RIL	RPP
DIS 0%	0,4054	0,4054	0,9784	0,0223	0,8625
DIS 10%	0,4371	0,3691	0,9779	0,2256	0,9101
DIS 30%	0,516	0,3072	0,9783	0,02216	1,021
DIS 50%	0,6339	0,2378	0,9777	0,2281	1,217
CEN 0%	0,4082	0,4082	0,971	0,02985	0,8873
CEN 10%	0,4304	0,3813	0,9687	0,0323	0,9224
CEN 30%	0,5262	0,3209	0,9738	0,2686	1,028
CEN 50%	0,5987	0,2644	0,9675	0,03363	1,173

L'andamento temporale di ciascun indice è stato ricavato come somma (energetica) progressiva ad ogni passo di simulazione. Tutti gli indici forniscono (con intensità diverse) informazioni interessanti su come, al variare delle condizioni di funzionamento della centrale di generazione e della richiesta dell'utenza, le prestazioni si evolvono nel tempo: tale informazione potrebbe essere usata per rivedere le modalità di gestione e regolare la rete stessa con una logica più complessa che massimizzi tale indici. A titolo di esempio viene mostrato l'andamento del PEF (Figura 347) per la configurazione centralizzata con il 10% di potenza installata da rinnovabile: l'indice evidenzia come le migliori prestazioni si ottengono nella prima fase della stagione invernale per poi peggiorare in estate ed invertire nuovamente l'andamento nella fase finale dell'anno; tale comportamento può essere imputato alla percentuale di produzione bassa da rinnovabile che fa lavorare in parzializzazione il cogeneratore con una riduzione di combustibile consumato inferiore al beneficio indotto dall'uso del campo solare.

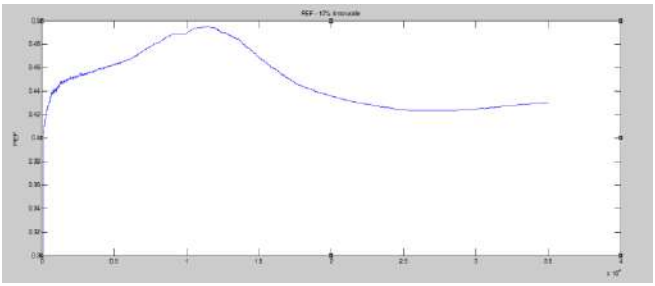


Figura 347. Indice PEF nel caso in cui la potenza installata è per il 10% da rinnovabile

Analisi exergetica

Dai risultati delle analisi prestazionali condotte sul modello software sviluppato nel corso delle annualità precedenti, è emersa l'esigenza di cercare degli strumenti di valutazione che consentano di approfondire meglio il comportamento della rete in funzione dei livelli termici dei fluidi termovettori usati e delle perdite generate durante la distribuzione dello stesso. Ci si è resi conto che l'approccio energetico non era sufficiente a fornire le informazioni volute per cui si è pensato di individuare nell'analisi exergetica la metodologia in grado di fornire le informazioni ricercate; questa infatti è basata sulla combinazione della prima e della seconda legge della termodinamica e può, quindi, mettere in evidenza aspetti in grado di valutare meglio come incrementare l'efficienza del sistema energetico (rete) nella conversione di energia.

La soluzione scelta è stata quella di effettuare l'analisi mediante la determinazione del rendimento exergetico globale della rete e di quello relativo al volume di controllo comprendente la rete di distribuzione e valutando solo i flussi termici, per le due configurazione (centralizzata e distribuita) utilizzate e descritte in precedenza.

Il rendimento exergetico globale è definito come:

$$\eta_{ex.globale} = \frac{Ex_{Qt} + Ex_{Ef} + Ex_{El}}{Ex_{comb} + Ex_{Wpompaggio}}$$

In cui Ex_{El} è l'exergia associata all'energia elettrica, che, nel caso considerato, coincide con l'energia elettrica, Ex_{Qt} è l'exergia associata al fabbisogno termico invernale (Q_t), calcolata con la formula:

$$Ex_{Qt} = Q_t \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{inv}}{T_{utenze}^{inv}}\right)$$

con T_{amb}^{inv} temperatura ambientale in inverno e T_{ut}^{inv} temperatura che l'utenza deve raggiungere.

Ex_{El}^{f} è l'exergia associata all'energia frigorifera fornita alle utenze (E_f)durante il periodo estivo, data da:

$$Ex_{Ef} = E_f \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{est}}{T_{utenze}^{est}}\right)$$

Il suddetto rendimento è introdotto con riferimento al processo globale di produzione di energia, si utilizza perciò Ex_{comb} in quanto è l'exergia associata al potenziale chimico del combustibile:

$$Ex_{comb} = (v_{comb} H_i)$$

Con v_{comb} pari al volume di combustibile consumato e H_i al potere calorifico inferiore dello stesso.

$Ex_{Wpompaggio}$ è l'exergia associata alla potenza di pompaggio, che è stata considerata trascurabile per ipotesi.

Nella Tabella 96 sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate per i due scenari e per le città di Milano, Roma e Palermo; è riportato anche il rendimento termico (di primo principio) definito come:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{aux}}{Q_{comb}}$$

essendo Q_{aux} il calore che la centrale di generazione trasferisce in rete e Q_{comb} l'energia associata al combustibile consumato.

Tabella 96. Rendimenti exergetici invernali/estivi scenari centralizzato e distribuito

Scenario centralizzato	$\eta_{ex._invernale}$	η_{ex_estivo}	η_{th}	Scenario distribuito	$\eta_{ex_invernale}$	η_{ex_estivo}	η_{th}
Scenario centralizzato Milano	44,36%	36,43%	49,6%	**Scenario distribuito Milano**	43,64%	36,79%	47,4%
Scenario centralizzato Roma	39,21%	35,42%	49,8%	**Scenario distribuito Roma**	38,87%	36,21%	45,9%
Scenario centralizzato Palermo	37,17%	35,51%	47,9%	**Scenario distribuito Palermo**	37,59%	36,48%	44.1%

I rendimenti exergetici si presentano più bassi di quelli energetici in quanto tengono conto delle irreversibilità intrinseche ai processi di trasformazione dell'energia che sono funzioni delle temperature in gioco e che sono responsabili delle perdite termiche non recuperabili. L'informazione contenuta nel rendimento exergetico è quindi più "forte" in quanto dà valore a tali perdite e fornisce indicazioni sulla qualità dei flussi di potenza scambiati. Per dimostrare ciò l'analisi exergetica è stata opportunamente modificata. Il rendimento exergetico precedentemente introdotto, considera in un unico volume di controllo il sistema di generazione, la rete di distribuzione e le utenze; l'interesse deve essere posto sull'ottimizzazione exergetica del sistema rete-utenze, mettendo da parte le informazioni sul sistema di generazione e spostando l'attenzione sul processo squisitamente termico che avviene nell'ideale volume di controllo comprendente rete, utenze e centrale di generazione. Per evidenziare ciò, si è introdotto un rendimento, definito exergetico di rete, così modificato (sempre operando una differenziazione tra funzionamento estivo ed invernale, dettata dalle diverse temperature operanti):

$$\eta_{ex.rete}^{inv} = \frac{Ex_{Qt}}{Ex_{rete}^{inv}} \qquad \eta_{ex.rete}^{est} = \frac{Ex_{Ef}}{Ex_{rete}^{est}}$$

in cui $Ex_{Qt} = Q_t \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{inv}}{T_{utenze}^{inv}}\right)$ e $Ex_{Ef} = E_f \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{est}}{T_{utenze}^{est}}\right)$ sono le stesse quantità considerate in precedenza;

$$Ex_{rete}^{inv} = Q_{aux}^{inv} \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{inv}}{T_{rete}^{inv}}\right) \text{ e } \qquad Ex_{rete}^{est} = Q_{aux}^{est} \cdot \left(1 - \frac{T_{amb}^{est}}{T_{rete}^{est}}\right)$$

con Q_{aux} pari al calore che la centrale di generazione trasferisce in rete e T_{rete} la temperatura della rete di distribuzione, calcolati rispettivamente in inverno ed estate[17].

Ex_{rete} rappresenta l'exergia associata alla potenza trasferita dal sistema di generazione all'acqua di rete e permette di tenere in conto il livello termico del fluido termovettore nel momento dell'immissione in rete.

La Tabella 97 riporta il valore del rendimento exergetico di rete η_{ex}^{rete} al variare della temperatura di distribuzione del fluido termovettore, differenziati per il funzionamento estivo ed invernale, per gli scenari centralizzato e

[17] Si precisa che ai fini dell'individuazioni dei periodi di accensione degli impianti, il periodo di riscaldamento è definito secondo la normativa vigente, mentre il periodo di raffrescamento è definito come il complementare annuale del periodo di riscaldamento (in ogni caso l'accensione effettiva dell'impianto è pilotata dalle temperature interne dell'edificio)

distribuito, per la sola città di Roma, e il rendimento termico di primo principio η_{th} .I risultati presentati mettono bene in evidenza come il rendimento di primo principio rimane sostanzialmente invariato alle diverse temperature dell'acqua mentre i rendimenti exergetici mostrano, nelle diverse configurazioni, variazioni di diversi punti percentuali che permettono di valutare per ciascuna configurazione il livello ottimale con cui distribuire il fluido termovettore; in particolare nello scenario distribuito i rendimenti estivi non subiscono variazioni rilevanti in quanto le temperature operative rimangono invariate, così come nello scenario centralizzato lo stesso rendimento estivo varia poco nei tre casi esaminati in quanto le differenze delle temperature della rete "fredda" sono di solo 1 °C (e non è possibile fare diversamente perché altrimenti non si garantisce il corretto funzionamento della macchina ad assorbimento).

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/052.

Tabella 97. Rendimenti exergetici al variare della temperatura di rete

Scenario centralizzato	$\eta_{ex_rete_invernale}$	$\eta_{ex_rete_estivo}$	η_{th}	Scenario distribuito	$\eta_{ex_rete_invernale}$	$\eta_{ex_rete_estivo}$	η_{th}
T_{rete_inv} =85°C T_{rete_est}= 5°C	19,44%	16,42%	49,32%	T_{rete_inv} =85°C T_{rete_est}= 90°C	18,61%	4,417%	45,63%
T_{rete_inv}=75°C T_{rete_est}= 4°C	22,3%	16,04%	49,27%	T_{rete_inv}=75°C T_{rete_est}= 90°C	21,42%	4,43%	45,70%
T_{rete_inv} =65°C T_{rete_est}= 3°C	26,11%	15,48%	49,14%	T_{rete_inv} =65°C T_{rete_est}= 90°C	25,46%	4,43%	45,67%

a.2 Analisi di soluzioni progettuali e gestionali che favoriscano l'implementazione di nuovi servizi energetici nelle reti termiche in presenza di sistemi di poligenerazione

L'attività di ricerca condotta nel presente subtask ha avuto come obiettivo lo studio di nuovi servizi offerti dalle reti di teleriscaldamento in assetto poligenerativo ed in particolare è stata analizzata la possibilità di estendere alle reti termiche esistenti il servizio di scambio sul posto già ampiamente collaudato nelle reti elettriche in presenza di generazione distribuita.

Proseguendo lo studio delle annualità precedenti, sono stati sviluppati nuovi modelli per simulare gli scambi di potenza termica tra rete di teleriscaldamento e utente attivo dotato di proprio impianto solare termico gestito in modalità scambio sul posto.

Oltre allo sviluppo dei nuovi modelli, in questa annualità, è stato implementato, in ambiente MATLAB/Simulink, un codice per la lettura da remoto di misuratori termici installati in sottostazione a piè di stabile. Il nuovo codice è stato sviluppato in modo da poter essere integrato all'interno della piattaforma di simulazione delle reti di teleriscaldamento con l'obiettivo di gestire in tempo reale, tramite apposite schede hardware, i flussi di potenza di una sottostazione applicando gli algoritmi testati e validati in simulazione.

L'attività di ricerca è stata condotta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna con il quale sono stati individuati alcuni possibili layout di sottostazione finalizzati allo scambio bidirezionale di energia termica da generazione distribuita.

Il Dipartimento DIN, modificando opportunamente il proprio software CARDIF per il calcolo e la progettazione delle reti di teleriscaldamento tradizionali, ha potuto analizzare nel dettaglio le criticità che i nuovi layout di sottostazione bidirezionale potrebbero generare rispetto ad una gestione centralizzata della rete. Il DIN implementando con il proprio software una rete termica realistica costituita da 27 nodi, 26 rami, 11 utenze (di cui una attiva) ha potuto valutare in definite condizioni operative della rete le alterazioni della temperatura generata dalla sottostazione bidirezionale in ciascun nodo della dorsale di mandata e di ritorno rispetto al caso con solo utenti passivi.

L'analisi in regime stazionario condotta dal DIN, descritta nel rapporto RdS/PAR2013/053, ha consentito ad ENEA di modellare all'interno dalla propria piattaforma di simulazione dinamica gli schemi di sottostazione bidirezionale che limitano i disturbi indotti alla gestione centralizzata e che meglio si integrano con le sottostazioni a piè di stabile delle reti di teleriscaldamento esistenti.

All'attività di ricerca ha collaborato anche il Dipartimento DIAEE dell'Università La Sapienza di Roma studiando la possibilità di fornire agli utenti della rete di teleriscaldamento servizi ancillari termici e come gli stessi possono essere integrati con gli impianti solari distribuiti [rapporto RdS/PAR2013/059].

Il DIAEE ha condotto un'indagine sui consumi termici degli elettrodomestici dedicati ai lavaggi (lavabiancheria e lavastoviglie) sia ad uso residenziale sia per applicazioni alberghiere e commerciali al fine di valutare l'impatto che i servizi ancillari termici possono generare sulla rete di teleriscaldamento rispetto alla fornitura di acqua calda per riscaldamento.

Per il suddetto scopo il DIAEE ha implementato all'interno della piattaforma di simulazione sviluppata da ENEA un algoritmo che aggrega i servizi ancillari per singolo piè di stabile in modo da poter simulare il carico richiesto alla rete di teleriscaldamento e come lo stesso potrebbe essere compensato dagli impianti solari termici connessi in regime di scambio sul posto.

In questo contesto, si è infine inserita l'attività di caratterizzazione metrologica e funzionale di misuratori, con lo studio di soluzioni progettuali e gestionali per la realizzazione di una rete multimetering, condotto in collaborazione con la Seconda Università di Napoli (Dip. DIII) e con la corrispondente attività sperimentale condotta da ENEA, attraverso l'implementazione ed il testing di un Advanced Metering Infrasctructure (AMI) basata su protocollo di comunicazione DLMS con protocollo di sincronizzazione TPSN, di seguito brevemente descritte.

Definizione dei nuovi modelli per la simulazione del net metering termico

L'attività di sviluppo e implementazione dei nuovi modelli condotta da ENEA è stata preceduta dall'analisi delle reti termiche del Nord Europa (Svezia, Danimarca, Austria) dove esistono da alcuni anni (il primo è stato installato sul tetto di una scuola in Danimarca nel 1994) molti esempi di impianti solari distribuiti che utilizzano la rete di teleriscaldamento come accumulo sia giornaliero che stagionale.

Nella seconda fase dell'attività di ricerca sono state analizzate le reti di teleriscaldamento nazionali al fine di valutare la possibilità di replicare in Italia esperienze documentate dello scambio sul posto termico.

L'indagine, condotta anche tramite l'utilizzo di questionari sottoposti ad alcuni gestori di rete nazionali, ha permesso di valutare le reali configurazioni delle sottostazioni utente (Figura 348) e le principali criticità che potrebbero ostacolare la diffusione degli impianti di generazione distribuita in regime di scambio sul posto. In particolare dallo studio emerge che la configurazione delle sottostazioni a piè di stabile consentirebbe la connessione dell'impianto solare d'utente solo in modo da preriscaldare la temperatura di ritorno in centrale con conseguente riduzione dell'efficienza degli impianti in carico al gestore; per questo motivo sono state analizzate delle configurazioni (Figura 349) che superassero questa criticità.

Dall'analisi delle temperature di esercizio delle reti di teleriscaldamento censite dal Rapporto AIRU 2012 emerge che circa il 68% delle reti termiche di teleriscaldamento nazionali sono esercite ad una temperatura inferiore a 110°C e quinti compatibili con i livelli termici raggiungibili dai collettori solari sottovuoto disponibili in commercio.

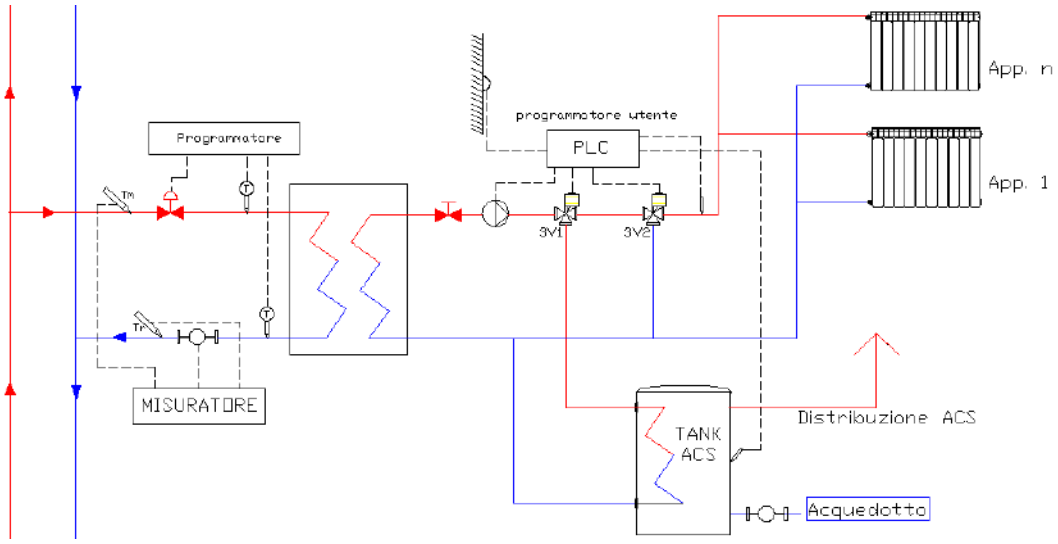


Figura 348. Schema tipo di sottostazione a piè di stabile con principali componenti e sistema di controllo

Per poter simulare il servizio di scambio sul posto applicato alle reti di teleriscaldamento esistenti è stato necessario caratterizzare più nel dettaglio il modello di sottostazione d'utente presente nella piattaforma software sviluppata nelle annualità precedenti.

In particolare sono stati modellizzati tutti i singoli componenti che costituiscono una sottostazione a pie di stabile per gestire i flussi di potenza scambiati con la rete: scambiatore di calore bidirezionale, valvole a tre vie e regolatore PID dettagliatamente descritti nel rapporto RdS/PAR2013/054.

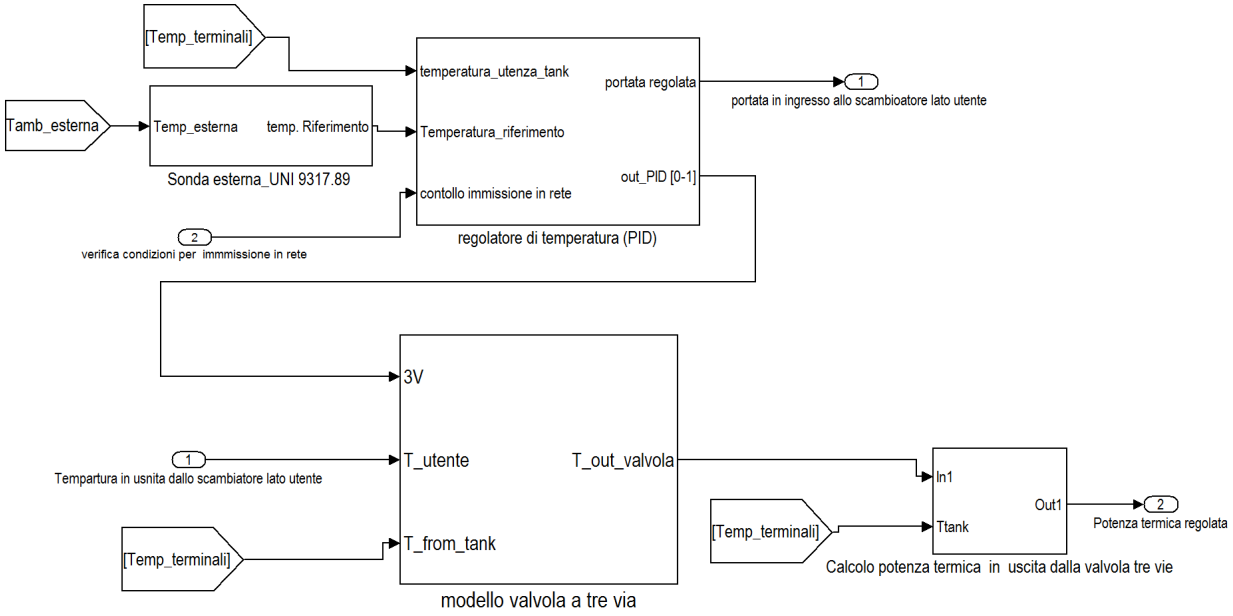


Figura 349. Schema a blocchi Simulink con input e output principali del modello di valvola a tre vie e regolatore PID

A titolo di esempio si riporta in Figura 350 e 351 rispettivamente la curva di regolazione climatica implementata secondo UNI 9317.89 e l'andamento annuale della temperatura di esercizio dell'impianto termico regolata dalla valvola a tre vie; quest'ultima durante la stagione estiva viene mantenuta al valore di riferimento per la fornitura di ACS dalla rete (55°C).

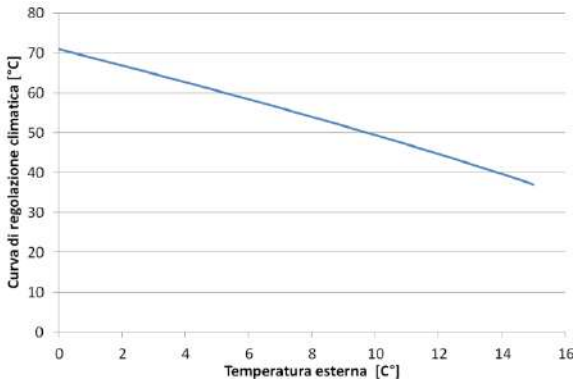


Figura 350. Curva di regolazione climatica della temperatura di esercizio dei terminali di utente secondo UNI 9317.89

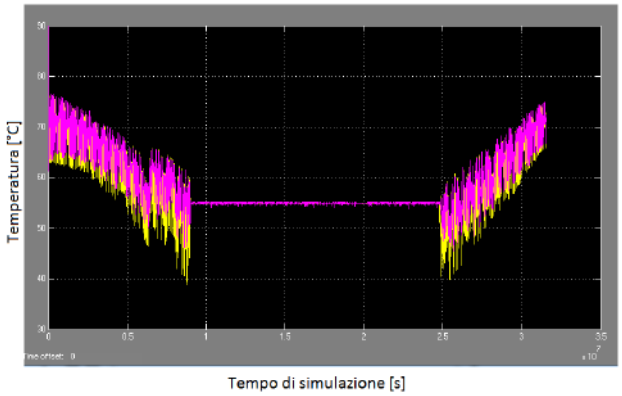


Figura 351. Simulazione annuale in Simulink della temperatura reale dell'impianto termico di utente (magenta) e della temperatura di riferimento fornita dalla curva climatica

Dopo aver caratterizzato nel dettaglio il modello di sottostazione esistente, sono stati implementati i due schemi di Figura 352 per poter connettere alla rete un impianto solare d'utente e gestirlo in regime di scambio sul posto termico. Entrambi gli schemi implementati privilegiano l'autoconsumo e prevedono l'immissione della potenza termica prodotta in eccesso dal campo solare nel ramo di mandata.

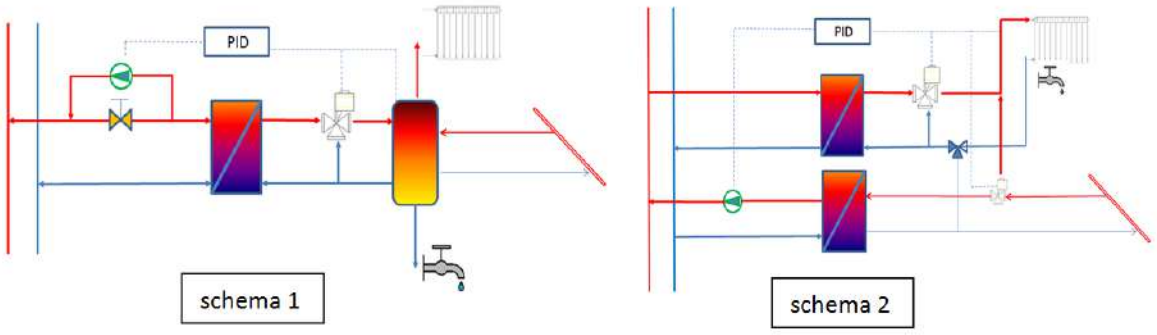


Figura 352. Schemi di sottostazione bidirezionale con immissione diretta in rete da accumulo (schema 1) e con scambiatore dedicato (schema 2) implementati in MATLAB/Simulink

In particolare lo schema 1 è applicabile alle sottostazione a piè di stabile già dotate di accumulo giornaliero per acqua calda sanitaria e riscaldamento; l'impianto solare è connesso direttamente all'accumulo dell'edificio in modo da preriscaldare l'acqua durante la stagione invernale e surriscaldarla durante la stagione estiva. Le suddette condizioni operative evitano che avvenga una frequente inversione del flusso sul lato primario limitandolo alla sola stagionalità estiva.

Lo schema 2 anche se caratterizzato da una connesione diretta dell'impianto solare alla rete termica, presenta una complicazione impiantistica e quindi maggiori costi rispetto allo schema precedente; la seconda soluzione, infatti, necessita di uno scambiatore di calore dedicato per immettere in rete la potenza termica generata e un sistema di valvole a tre vie per favorirne l'autoconsumo durante la stagione invernale.

Il sistema di controllo delle due nuove sottostazioni è stato riprogrammato in modo da poter gestire la valvola a tre vie di utente e la pompa lato rete per immettere potenza in rete quando i livelli termici lo consentono. In particolare per lo schema 1 il flusso di potenza si inverte quando la temperatura raggiunta dell'accumulo è superiore almeno di 2 °C la temperatura della dorsale di mandata.

Gli schemi proposti alterano comunque le portate circolanti sulla dorsale di mandata obbligando interventi da parte della centrale; questi vengono simulati con un adeguamento della potenza generata dall'impianto centralizzato, poiché la piattaforma software sviluppata non simula gli aspetti idraulici della rete di teleriscaldamento.

Per mostrare le funzionalità del nuovo strumento si riportano, a titolo di esempio, i risultati della simulazione annuale di una rete termica locale alimentata da un cogeneratore da 150 kWt a servizio delle seguenti utenze:

- Edificio monofamiliare da 100 m^2 con impianto solare da 50 m^2 connesso in regime di scambio sul posto alla rete termica secondo lo schema 1 (edificio 1)
- Edificio scolastico da 1000 m^2 su due livelli
- Edifico ad uso uffici da 500 m^2
- un complesso di villette monofamiliare da 100 m^2 ciascuna.

Dai risultati di Figura 353 si evince come nel caso di impianto in isola la temperatura dell'accumulo raggiunge i livelli massimi operativi limitando il funzionamento del campo solare e la produzione annua; la connessione dell'impianto solare alla rete consente invece di mantenere la temperatura dell'accumulo entro i limiti operativi immettendo in rete la sovra produzione di energia termica.

Inoltre la connessione dell'impianto solare in regime di scambio sul posto garantisce benefici energetici ed economici rispetto all'impianto in isola, infatti, come si evince dal diagramma di Figura 354 la produzione su base annua del campo solare connesso alla rete si incrementa di circa quattro volte rispetto al caso isolato fino a coprire il fabbisogno dell'edificio.

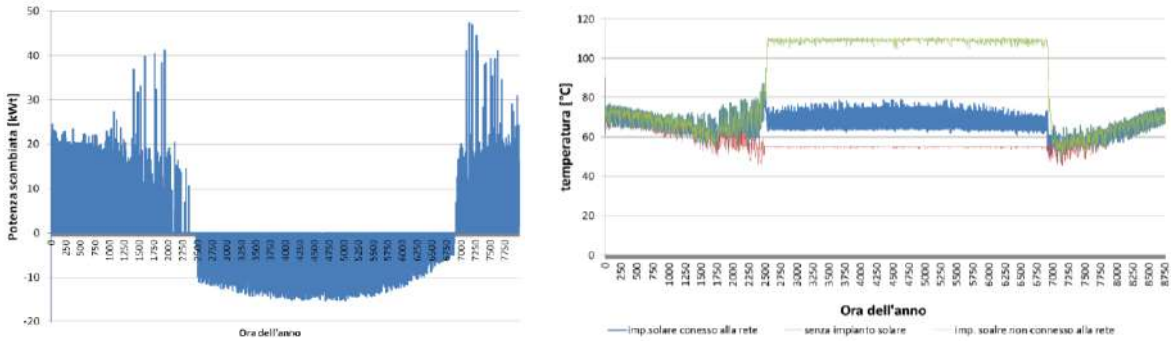


Figura 353. Potenza termica scambiata con la rete dall'utente con impianto solare connesso con schema 1: assorbita dalla rete (positiva) e immessa in rete (negativa) - Temperatura dell'accumulo di sottostazione in diverse configurazioni dell'impianto solare

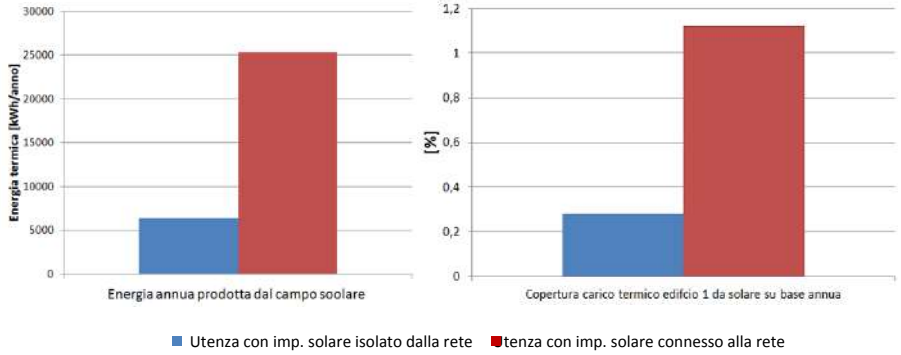


Figura 354. Produzione annua del campo solare installato in copertura dell'edificio 1 e copertura del fabbisogno termico annuo

E' stata condotta anche una valutazione economica dei benefici ottenibili ipotizzando un prezzo di cessione in rete dell'energia termica prodotta dal campo solare pari a 0,04 €/kWh e un costo di acquisto dell'energia termica paria a 0,09 €/kWh. Dai risultati dell'analisi riportati in Figura 355 la gestione in regime di scambio sul posto incrementa di circa il 30% il risparmio economico annuo per riscaldamento e acqua calda sanitaria rispetto all'impianto gestito in isola.
Al fine di poter validare pienamente i modelli di scambio termico con la rete implementati i questa annualità, si è reso necessario sviluppare uno strumento di smart metering che consentirà la lettura e controllo da remoto di una sottostazione attiva di utente.

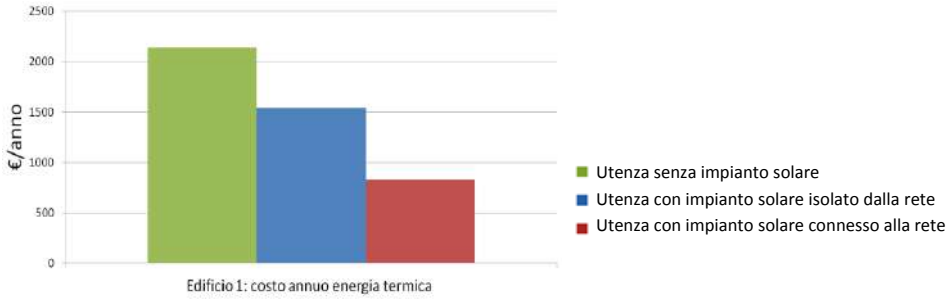


Figura 355. Costo annuo per riscaldamento e ACS valutata come costo di acquisto dell'energia termica da rete e ricavi da cessione dell'energia in rete

Per il suddetto obiettivo è stato implementato un codice in ambiente MATLAB/Simulink in grado di riprodurre il protocollo di comunicazione MODBUS su TCP/IP comune a molti strumenti di misura; il codice è in grado di interrogare e ricevere il misuratore di energia termica installato in sottostazione da una postazione remota connessa tramite una comune rete di dati.

Per testare il nuovo codice sviluppato in MATLAB/Simulink è stato installato presso una sottostazione del centro ENEA Casaccia un misuratore di portata e temperatura a ultra suoni con sensori di tipo clamp on (ad induzione) dotato di una uscita Modbus con la quale vengono resi disponibile le misure effettuate.

Per interrogare il misuratore da remoto è stato installato a valle dello strumento una interfaccia in grado di trasmettere e ricevere comandi tramite il protocollo di rete Internet (TCP/IP). In Figura 356 è riportato lo schema a blocchi di interfaccia del codice Simulink e lo strumento di misura.

Con il codice implementato in MATLAB/simulink le misure vengono riportate a schermo e in caso di valori al di fuori di soglie preimpostate viene notificato un allarme.



Figura 356. Diagramma di controllo dello strumento Smart meter e interfaccia di rete

Parallelamente all'utilizzo del interfaccia LAN basata su convertitore Modbus su TCP/IP, facilmente reperibile in commercio ma non programmabile, si è investigata la possibilità di utilizzare delle schede elettroniche dotate di un microcontrollore e di porte input/output, in grado di leggere tramite protocollo Modbus o equivalente le misure dallo strumento e inviare i dati via LAN a un PC remoto.

La scheda programmata in MATLAB/Simulink consentirà di inviare dei comandi di controllo via Modbus ad un attuatore per poter gestire i flussi di potenza della sottostazione. Per questo scopo sono stati individuati alcuni hardware tra cui il microcontrollore ARDUINO, una scheda modulare facilmente programmabile e molto versatile e corredata di componenti aggiuntivi opzionali necessari alla connessione verso lo strumento e la rete.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/054.

Caratterizzazione metrologica e funzionale di reti di misuratori

Oggetto della presente attività è stato la progettazione, realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di rete di misuratori, che è stata condotta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale della Seconda Università di Napoli e la successiva attività sperimentale condotta da ENEA che ha riguardato l'implementazione ed il testing di un'AMI basata su protocollo di comunicazione DLMS con protocollo di sincronizzazione TPS, di seguito brevemente descritta.

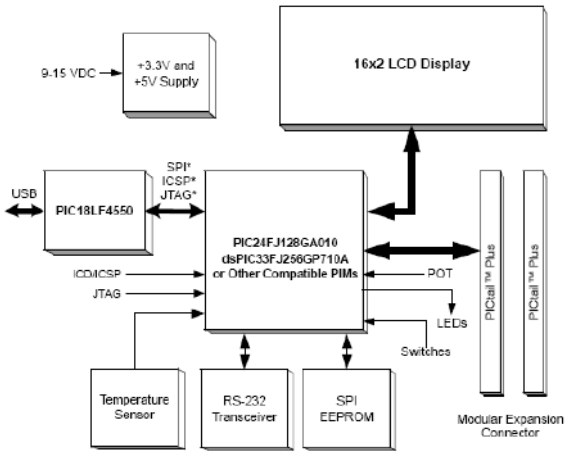


Figura 357. Schema a blocchi della scheda di sviluppo

Il primo passo delle attività è consistito nella messa a punto dell'infrastruttura di sperimentazione. In particolare, i nodi client-server sono stati implementati mediante schede; più in dettaglio, per il protocollo DLMS[18] è stata utilizzata una scheda di sviluppo della Microchip sulla quale è montato un microcontrollore mid-range della famiglia DSPic33 (Figura 357).

La scheda di sviluppo selezionata offre la possibilità di scegliere tra due tipi di microcontrollore: uno della famiglia PIC24 e l'altro della famiglia DSPic. Per le prove, è stato scelto il DSPic, più performante nel processare operazioni matematiche, grazie al supporto DSP, che include un moltiplicatore atto ad eseguire operazioni tra interi con latenze non superiori ai due colpi di clock. La scheda, inoltre, utilizza un alimentatore dedicato da 9 VDC, che distribuisce due bus di alimentazione uno a 3.3V e l'altro a 5V. Scambio

[18] Device Language Message Specification: permette lo scambio di messaggi tra dispositivi diversi per mezzo di un linguaggio comune e deriva dal concetto che entità, che non si conoscono inizialmente, devono comunicare.

dati e comunicazione sono consentiti attraverso diverse porte: USB, RS232 e JTAG per la programmazione ed il debug.

Lo stato del software (su richiesta dell'utente) e i messaggi di diagnostica sono evidenziati da un display. Il codice per la gestione del display è stato direttamente reperito tra le tante librerie open che microchip mette a disposizione per la programmazione dei propri dispositivi. Ad integrazione, la scheda presenta, inoltre, a bordo 8 light emitting diodes che possono essere usati per debug e informazioni all'utente.

Il collegamento semplificativo tra scheda di sviluppo e PC è stato eseguito attraverso una porta seriale RS232. Il collegamento siffatto non manca di generalità; infatti, anche se client e server fossero connessi per mezzo di un link fisico diverso, il protocollo DLMS si farebbe carico della gestione del trasporto dei pacchetti e quindi il software dovrebbe essere modificato solo nella parte relativa al livello di trasporto per garantire il funzionamento del sistema su un media diverso. Il software su PC permette di dialogare con la scheda di sviluppo su cui gira il protocollo DLMS e consente di fare richieste di misure secondo le specifiche OBIS (OBIS: insieme di codici atti ad identificare grandezze di interesse prelevate dai meter e trasmesse ai concentratori).

Per il test del codice progettato, ci si è serviti di un client progettato dalla Kalkitech che lavora a stretto contatto con Microchip. Il client chiamato DLMS Explorer è un software progettato per PC che gira con sistemi operativi Windows.

Poiché il DLMS non prevede un meccanismo di sincronizzazione nativo si è scelto di implementarne uno e montarlo nel protocollo. Il protocollo prescelto è stato il TPSN, Timing-sync Protocol for Sensor Networks, basato sulla modalità sender-receiver. La scelta è stata rivolta a privilegiare la semplicità del linguaggio (i dettagli dell'implementazione sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/057).

Progettati ed implementati i due protocolli di comunicazione e sincronizzazione, si è potuto procedere alla fase di prove sperimentali del prototipo.

In prima battuta, il collegamento tra i nodi è stato provato sia con il link seriale che con trasmissione radio; nel secondo caso non si è rilevato overhead rispetto al collegamento "fisico". Le prove sono state comunque eseguite con un link seriale via cavo.

Per due diverse velocità di trasferimento, a tre intervalli diversi di sincronizzazione (60/180/300 s), sono stati testati due tipi di pacchetti:

- Small packet: pacchetto leggero senza dati
- Large packet: ottenuto aggiungendo, al precedente pacchetto, byte dummy per appesantirlo.

I risultati ottenuti con le prove descritte nel precedente paragrafo, sono sintetizzati in Tabella 98.

Tabella 98. Prestazioni ottenute nei test

Baud Rate [bps]	Synchronization Interval [s]	Small packet		Large packet	
		Offset [us]	Delay [us]	Offset [us]	Delay [us]
460800	60	60	570	80	1420
	180	220	570	220	1420
	300	380	570	380	1430
57600	60	440	1990	380	7340
	180	1190	2000	1230	7320
	300	1950	2000	2000	7360

Dai valori ottenuti è possibile affermate che le prove effettuate hanno presentato risultati soddisfacenti. Infatti, l'infrastruttura AMI implementata, basata su linguaggio di comunicazione DMSL e sincronizzata con il protocollo TPSN, ha mostrato in tutte le prove un phase delay accettabile per le applicazioni di riferimento (trasmissione dati) come evidente anche dall'andamento del ritardo misurato, in funzione del transmission rate (Figura 358). Dal diagramma, infine, si ricava anche che, all'aumentare del Baud rate, il livello di sincronizzazione migliora; d'altra parte, però un Baud rate elevato aumenta la probabilità di errore durante lo scambio di pacchetti. Pertanto, a fronte di un valore del delay comunque soddisfacente, risulterà necessario determinare il Baud rate ottimale, in funzione dell'ambiente in cui si installa la rete.

Va specificato, infine, che, alla luce degli interessanti risultati ottenuti e, al fine di ottenere un ulteriore livello di comparazione, si procederà in futuro alla sincronizzazione della AMI sviluppata con altri protocolli di sincronizzazione e al conseguente confronto dei risultati.

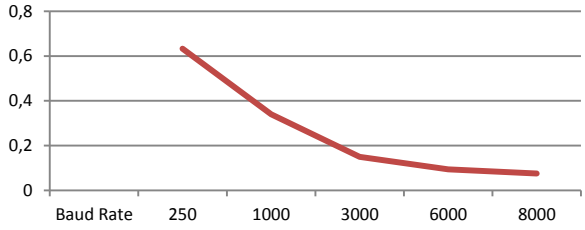


Figura 358. Andamento del Phase Delay

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nel seguente rapporto tecnico RdS/PAR2913/057.

a.3 Metodologia per l'individuazione del potenziale di applicazione e sviluppo delle reti di teleriscaldamento e di teleraffrescamento efficienti locali e su scala nazionale

Lo scopo dell'attività biennale oggetto del subtask a.3 è lo sviluppo di una metodologia per l'individuazione del potenziale di applicazione delle reti termiche efficienti, cioè che usano "per almeno il 50% energia rinnovabile, il 50% calore di scarto, il 75% calore cogenerato o il 50% una combinazione di tale energia e calore".

L'attività della presente annualità ha riguardato l'analisi della domanda di energia per il riscaldamento, l'analisi della produzione termica attuale tramite teleriscaldamento e l'analisi delle reti esistenti, l'analisi territoriale della presenza di possibili fonti di calore utilizzabili dalle reti, la definizione di parametri in grado di indicare la compatibilità tra un aggregato urbano ed una rete termica, l'individuazione dei comuni che soddisfino i requisiti di compatibilità e di quelli che presentino possibili fonti di calore utilizzabili.

L'analisi della domanda di energia per il riscaldamento si è tradotta nella stima della domanda di energia primaria per riscaldamento a livello regionale, provinciale e comunale per il settore civile e per il settore residenziale. Per la stima sono stati utilizzati, come dati di partenza, dati ENEA ed EUROSTAT relativi al consumo finale di energia totale (suddiviso per fonti) a livello nazionale e regionale per entrambi i settori, e dati ENEA relativi al consumo finale di energia per riscaldamento (suddiviso per fonti) a livello nazionale del settore residenziale. Da tali dati di partenza, come meglio dettagliato nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/055, è stata stimata, sia per il settore residenziale sia per il settore civile, la domanda di energia per riscaldamento a livello regionale relativa al 2011. Il 2011 è stato scelto come anno di riferimento in quanto è l'anno dell'ultimo censimento ISTAT della popolazione e delle abitazioni disponibile. La domanda regionale è stata ripartita a livello comunale tenendo conto della superficie delle abitazioni (dati Istat) e dei gradi giorno del comune. Sulla base dei dati urbanistici comunali (densità delle abitazioni ed abitativa) e dei dati della domanda, è stata analizzata la distribuzione dell'intensità energetica a livello provinciale e comunale.

Nella Figura 359 è riportata la distribuzione dei comuni e della domanda energetica per classe di intensità energetica, espressa come MWha/km^2 di superficie comunale. Nonostante circa il 10% dei comuni ricada nelle classi di intensità diverse da quella più bassa, ad essi corrisponde circa il 42% della domanda di energia per riscaldamento.

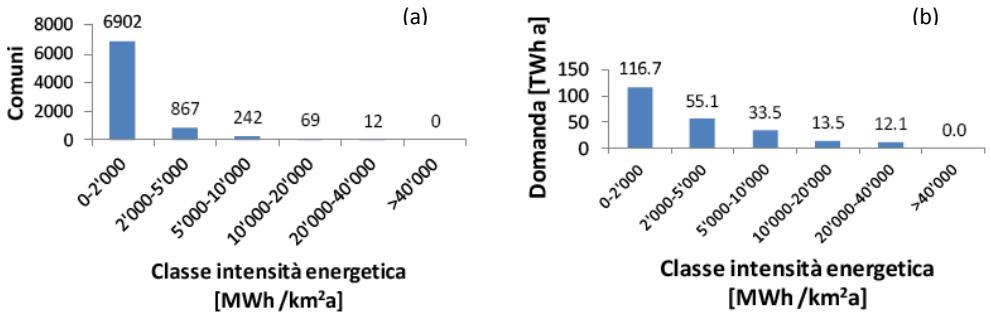


Figura 359. (a) Distribuzione comuni per intensità energetica; (b) Distribuzione domanda per riscaldamento per classe di intensità energetica

Per quanto riguarda l'analisi della distribuzione territoriale su scala nazionale delle reti di teleriscaldamento (TLR) esistenti, queste ultime sono state individuate e caratterizzate mediante l'esame puntuale della situazione esistente a livello: regionale, provinciale e comunale. Partendo quindi dai dati messi a disposizione dalle associazioni di categoria, è stata effettuata una mappatura del TLR esistente sia dal punto di vista energetico in termini di capacità di produzione, di tipologia del sistema di produzione e sia dal punto di vista territoriale in termini di densità di penetrazione e di tipologia di utenza riscaldata. Pertanto, in questa fase dell'indagine è stata effettuata, per le tipologie di utenze (residenziale, terziaria e produttiva) allacciate alle reti TLR, la mappatura della volumetria riscaldata da TLR a livello regionale, provinciale e comunale. In Figura 360si riporta la situazione a livello regionale.

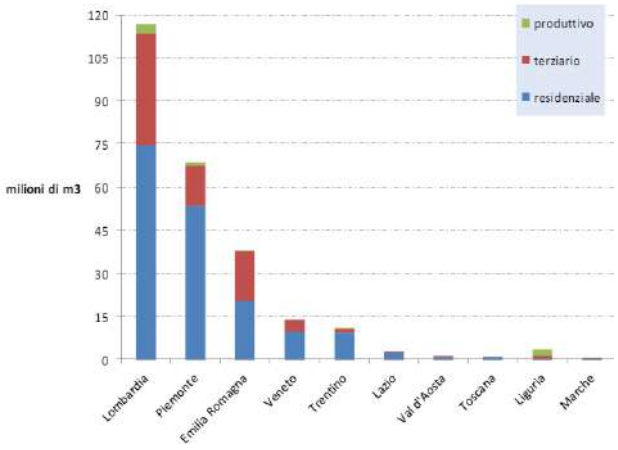


Figura 360. Volumetria riscaldata totale regionale

Tale analisi evidenzia che le utenze principalmente servite da reti TLR sono le utenze residenziali e, laddove le reti sono maggiormente sviluppate, come in Lombardia, Piemonte, Emilia Romagna e Veneto sono destinate, in misura confrontabile con il residenziale, anche alle utenze del settore terziario. Coerentemente, con i dati parziali delle volumetrie riscaldate, anche la fornitura di energia termica totale (riscaldamento e acqua calda sanitaria) delle reti TLR segue lo stesso andamento, come rappresentato a livello regionale (Figura 360).

Con l'obiettivo di individuare l'area territoriale dove è maggiormente diffuso il TLR e le caratteristiche tecniche ed energetiche delle reti presenti quali: estensione, numero reti, tipo (acqua calda o surriscaldata), è stata effettuata l'indagine puntuale dell' energia termica fornita e dispersa in ogni punto di produzione delle reti esistenti. In Figura 361 riporta, a livello regionale, la percentuale di energia termica fornita globalmente dalle reti.

Terminata l'indagine territoriale, è stata effettuata l'analisi energetica puntuale degli impianti a monte di ogni rete. L'obiettivo è stato quello di individuare la tipologia del sistema di produzione, il combustibile di alimentazione, l'energia termica prodotta da ogni impianto componente la rete e l'energia primaria spesa per l'alimentazione dello stesso.

Con tale indagine è stata valutata la quota di produzione di energia termica di ogni sistema produttivo sul valore totale di energia fornita da ciascuna rete alle utenze, sempre a livello regionale, provinciale e comunale. Come si evince dalla Figura 362 che riporta la produzione di energia termica a livello regionale, nel TLR i sistemi più diffusi sono la cogenerazione a gas naturale e la combustione di combustibili fossili.

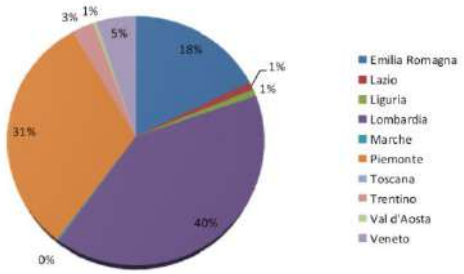


Figura 361. Energia termica totale regionale da TLR

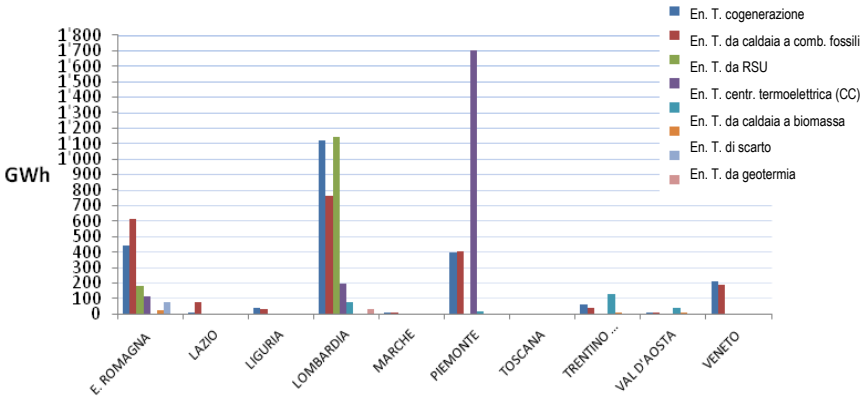


Figura 362. Energia termica totale prodotta per tipo di impianto

Inoltre, è stata completata l'analisi energetica del sistema di distribuzione con la valutazione puntuale per ogni rete TLR dell'energia termica fornita alla stessa e quella ricevuta in corrispondenza della centrale di scambio; la differenza rappresenta l'energia che arriva all'utenza. In particolare, in Figura 363 è riportato il confronto tra la quantità di energia fornita e quella dispersa nelle reti.

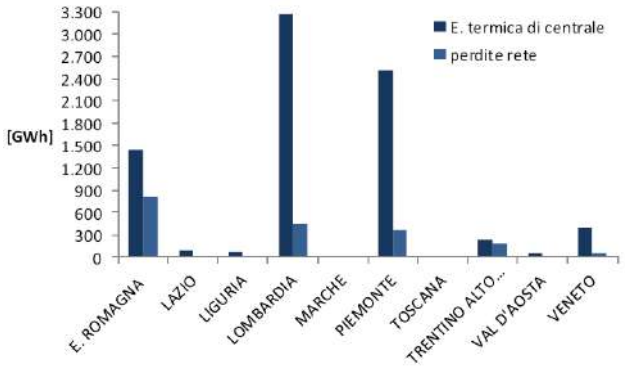


Figura 363. Energia termica e perdite - Reti TLR

Inoltre, nel corso della caratterizzazione tecnica-energetica, per ogni nodo della rete nazionale TLR sono state esaminate sia le potenze termiche totali installate e sia la "bontà tecnica" di ogni impianto. Nella Figura 364 è rappresentata la situazione della potenza termica totale installata in ogni provincia.

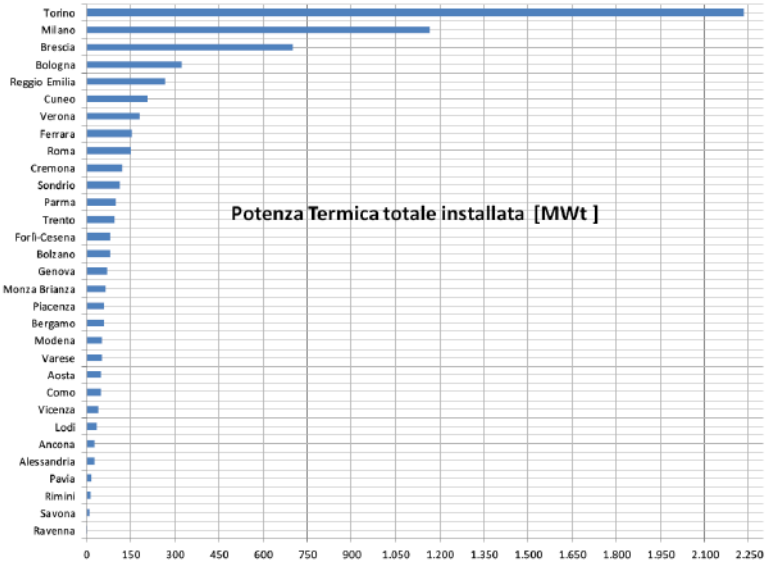


Figura 364. Potenza termica totale

Per il TLR un altro aspetto importante da esaminare è stata la spesa di energia primaria impiegata per la produzione dell'energia termica fornita all'utenza. Pertanto, per ogni tipologia di impianto a monte della rete TLR è stata effettuata la valutazione della quantità di energia primaria utilizzata per l'alimentazione dello stesso e per ogni nodo di produzione è stata valutata l'energia primaria di combustibile spesa per l'energia totale prodotta. Inoltre, considerando che gli impianti di produzione di ogni rete sono soprattutto di tipo cogenerativo, è stata valutata sia l'energia primaria totale per la produzione simultanea di energia elettrica e termica e sia l'energia primaria parziale per la sola produzione di calore fornito all'utenza. Pertanto, nel caso di produzione combinata, l'energia primaria parziale è stata calcolata attribuendola alle singole forme di produzione e utilizzando come pesi per la ripartizione delle stesse i corrispondenti rendimenti parziali e totale d'impianto. Si evidenzia che sono stati presi in considerazione, per ogni sistema di produzione, il tipo e la fonte di combustibile: ad es. nel caso di cogenerazione con RSU e gas naturale è stata calcolata la ripartizione tra le due risorse primarie.

In Figura 365 è rappresentata l'energia primaria parziale spesa complessivamente, in ogni regione, per ciascuna tecnologia e per fonte combustibile, corrispondente all'energia termica per il TLR.

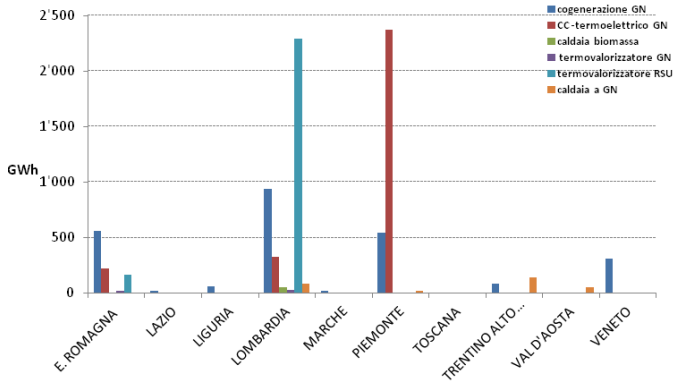


Figura 365. Energia termica primaria parziale - per tipo di impianto e fonte combustibile

E' stata inoltre realizzata un'analisi territoriale della presenza di risorse che possono essere direttamente correlate a fonti di calore la cui presenza è strategica nell'ottica di un loro utilizzo da parte di reti termiche esistenti o future: calore di scarto e calore da fonti rinnovabili. Relativamente al calore di scarto sono stati analizzati dati relativi alla presenza di centrali termoelettriche, termovalorizzatori e aziende di settori energivori (raffinerie, cockerie, acciaierie, lavorazione di materiali ferrosi, fonderie di materiali ferrosi e non ferrosi, cementerie, vetrerie, industrie chimiche, cartiere), basandosi sui dati E-PRTR (Registro europeo dell'emissione e trasferimento di sostanze inquinanti). E' stata analizzata la distribuzione, a livello comunale, provinciale e regionale, di tali siti produttivi, e, per i siti per cui l'informazione era disponibile, la produzione di CO_2.

Relativamente alle fonti rinnovabili sono stati considerati il solare, in termini di distribuzione della radiazione solare disponibile (da dati ENEA), la biomassa, in termini di distribuzione di biomassa potenzialmente disponibile (da dati ENEA), ed il geotermico, in termini di classe di temperatura disponibile a 2000 m di profondità (da dati dell'atlante geotermico europeo).

Nelle Figure 366 e 367 sono riportate le distribuzioni delle province nelle rispettive classi di: presenza di aziende energivore, radiazione solare incidente, temperatura geotermica disponibile a 2000 m e biomassa potenzialmente disponibile sul territorio provinciale.

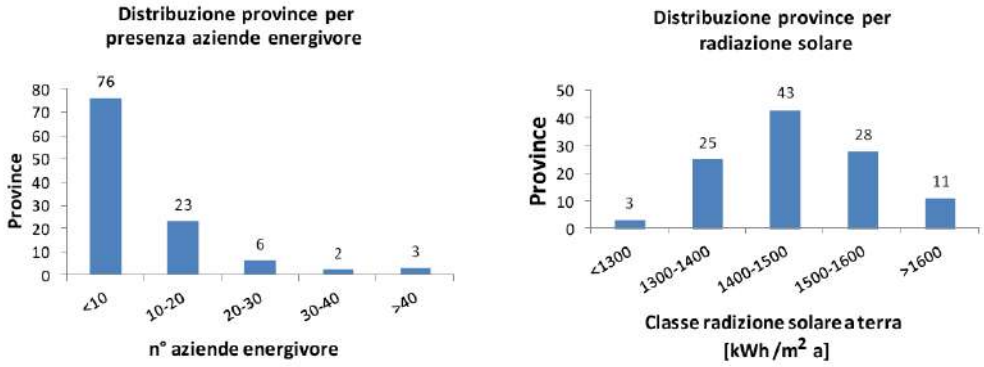


Figura 366. Distribuzione delle province per presenza di aziende energivore e per classi di radiazione solare incidente

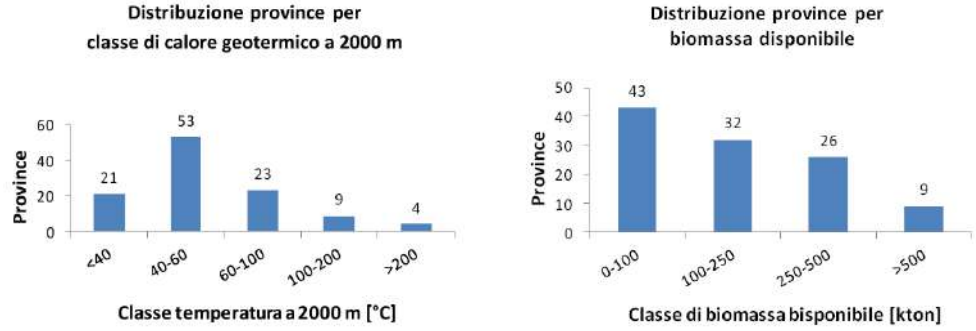


Figura 367. Distribuzione delle province per classi di temperatura disponibile a 2000 m di profondità e per classi di biomassa disponibile

A seguito dell'analisi della domanda di energia per riscaldamento, dei principali indicatori urbanistici e delle relazioni tra gli stessi, effettuata sia sull'intero corpo dei comuni italiani, sia, con un approfondimento specifico, sui comuni in cui sono già presenti delle reti termiche, sono stati individuati dei parametri significativi da considerare per valutare se un territorio comunale può essere definito compatibile con una rete termica. Tali parametri sono l'intensità energetica, la domanda specifica (definita come la domanda di energia per riscaldamento per m^2 di abitazioni), la densità urbana delle abitazioni (definita come i m^2 di abitazioni per km^2 di estensione comunale) ed il numero di abitanti del comune. Dalle analisi di distribuzione di tali parametri sono state individuate le soglie al di sopra delle quali un comune può essere considerato compatibile con una rete termica.

L'applicazione dei parametri ha consentito l'individuazione dei comuni compatibili. A partire da questi ultimi è stata poi valutata la presenza di potenziali fonti di calore utilizzabili, ottenendo la distribuzione territoriale dei comuni che, oltre a poter essere compatibili, presentano anche potenziali fonti di energia (calore di scarto, energia da rinnovabili) il cui utilizzo contribuirebbe a qualificare come efficienti le potenziali nuove reti termiche.

In modo analogo, per i comuni in cui esistono già reti termiche, l'applicazione dei parametri di compatibilità e delle relative soglie, e la presenza di potenziali fonti di energia rinnovabile o da processo, ha portato all'individuazione ai comuni maggiormente compatibili con un'estensione delle reti esistenti. In Figura 368a sono raggruppati a livello regionale i comuni compatibili con reti termiche TLR e, tra questi, quelli che presentano attività energivore o disponibilità di biomassa. In Figura 369b è rappresentata la distribuzione a livello di provincia dei comuni già dotati di reti TLR, di quelli che rispettano i criteri di compatibilità e di quelli che presentano attività energivore o disponibilità di biomassa.

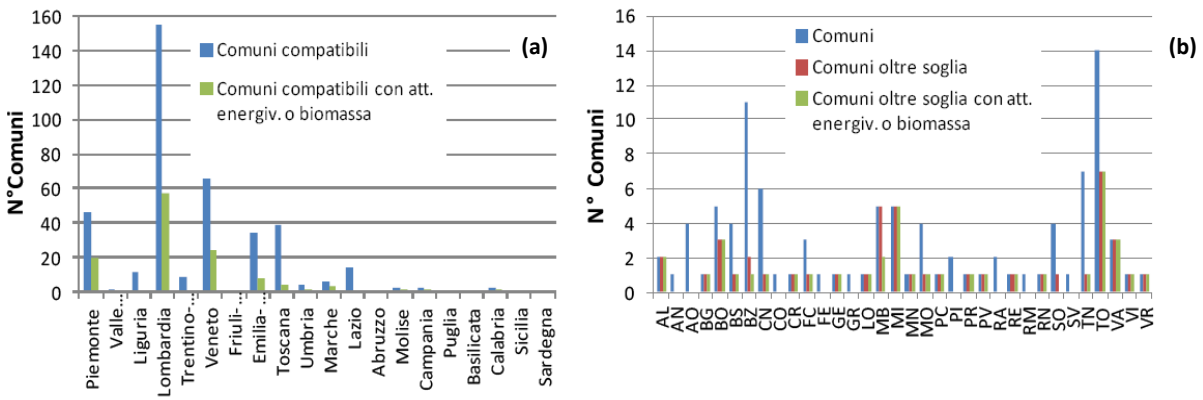


Figura 368. (a) Distribuzione regionale dei comuni compatibili con reti termiche; (b) Distribuzione provinciale dei comuni dotati di reti termiche

Infine, sempre relativamente alle reti TLR esistenti, sono state individuate quelle che possono essere già definite "efficienti", sono stati ipotizzati differenti scenari attraverso cui le attuali reti potrebbero essere trasformate in efficienti. Per ogni scenario, partendo dall'analisi della singola rete, è stato calcolato il calore, attualmente prodotto da caldaie a combustione, che dovrebbe derivare da cogenerazione o da fonte rinnovabile o da calore di scarto per rendere efficienti tutte le reti esistenti. Tale calore è stato calcolato per diversi ambiti territoriali (nazionale e regionale), e a livello nazionale è emerso che trasformando in energia da cogenerazione circa il 33% dell'energia termica attualmente prodotta con caldaie a combustione fossile (equivalente a circa il 9% dell'energia termica totale prodotta dalle reti TLR) tutte le reti esistenti potrebbero essere qualificate come reti efficienti.

In Figura 369 è riportato uno scenario di trasformazione delle reti in "efficienti" basato sul solo aumento della quota di energia da cogenerazione: per ciasca regione sono riportate le quote di calore attualmente prodotto da rinnovabili, calore di scarto e cogenerazione, mentre l'attuale quota prodotta da combustione è stata suddivisa nella parte minima che deve essere trasformata (porzione viola, di cui sono riportati i valori) e nella parte residua.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/055.

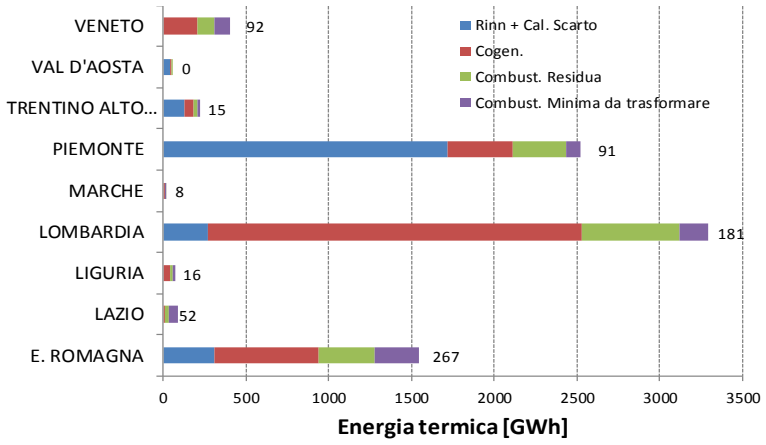


Figura 369. Energia termica prodotta e quota di energia integrativa S.E.

b. Gestione ottimale di reti di edifici

L'obiettivo di questa linea di attività è lo sviluppo di una metodologia per la gestione integrata di una rete di edifici terziari da applicare in uno Smart Village sperimentale, al fine di supportare il gestore energetico nell'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.

In particolare l'idea di base è quella di dotare la rete di edifici di sensoristica, sistemi di attuazione e di trasmissione dati ed un sistema centralizzato dove viene sviluppata la modellazione della rete, la diagnostica su ogni edificio della rete, la comparazione tra le prestazione dei vari edifici, la gestione ottimale e l'"active demand".

Gli obiettivi che si vogliono perseguire nell'attuale Accordo di Programma riguardano quindi metodologie di modellazione dei consumi termici ed elettrici, metodologie di analisi dati avanzata (diagnostica) e controllo adattivo, metodologie per l'impostazione automatica di set point per la gestione ottimale degli edifici e per attuare le richieste di "active demand".

Nella prima annualità dell'AdP 2012-2014 le metodologie sviluppate nei precedenti PAR sono state applicate alla diagnostica e controllo adattivo di un edificio reale, è stato sviluppato un simulatore semplificato di consumi termici di una rete di edifici e sviluppate metodologie di ottimizzazione multiobiettivo. Inoltre sono state svolte le attività di approvvigionamento di strumentazione propedeutiche ad una reale gestione attiva della domanda energetica.

L'attività svolta nell'ambito del PAR 2012 è stata finalizzata a:

- sviluppo di un simulatore dei consumi di un edificio/rete di edifici;
- definizione degli algoritmi di ottimizzazione e test preliminare su simulatore;
- validazione di metodologie di diagnostica e controllo su un singolo edificio;
- implementazione di un sistema di monitoraggio ed analisi consumi di una rete di edifici ;
- ampliamento funzioni "Smart Village Casaccia";
- definizione dello scenario di riferimento teorico di "active demand";
- partecipazione ai network europei.

Le attività del PAR 2013 hanno riguardato essenzialmente la prosecuzione delle attività del precedente PAR coerentemente agli obiettivi prefissati per il triennio. In particolare le attività si sono focalizzate sui seguenti sub-obiettivi:

- Estensione dei modelli diagnostici e di controllo
- Sviluppo e validazione su simulatore di metodologie per active demand
- Partecipazione ai network di ricerca europei e disseminazione scientifica

b.1 Estensione dei modelli diagnostici e di controllo ed applicazione alla rete di edifici

Modello di diagnostica della climatizzazione e sviluppo modulo supervisione BEMS

Nel presente obiettivo il modello diagnostico sulla linea luci, validato su singolo edificio nella annualità precedente (RdS/2013/119) è stato applicato alla linea del condizionamento di un edificio pilota.

In primo luogo, in collaborazione con il Politecnico di Torino [rapporto RdS/PAR2013/061], sono state definite le condizioni e le regole che individuano anomalie sul sistema di condizionamento, seguendo la metodologia preprocessing → situation assessment → cause.

Preprocessing:
- P61. Outlier potenza elettrica
- P24c. Percentuale di presenza occupanti
- P51. Orario di lavoro

Situation Assessment:
- S2a. Accensione di un elevato numero di fan coil
- S30. Numero di stanze occupate alto

Cause :
- C27. Fancoil accesi al di fuori degli orari di lavoro o in condizioni di assenza degli utenti.

Successivamente ENEA [rapporto RdS/PAR2013/060] ha sviluppato il modello di data fusion delle regole. Di seguito si riportano i passi principali di tale analisi, sviluppata nei precedenti PAR[19], che la Figura 370 sintetizza attraverso un tipico processo *bottom-up* :

- le grandezze misurate direttamente dalla sensoristica sono oggetto di elaborazioni che determinano degli indicatori adimensionali circa le prestazioni energetiche dell'edificio; questa fase è denominata anche di preprocessing, ove vengono messe in risalto le evidenze anomale più significative;
- sono applicati algoritmi di fault detection statistici, di pattern recognition, predittivi e su questi sono applicati algoritmi di "*fuzzy logic*"per tenere conto del problema dell'incertezza, in quanto alcune informazioni non sono chiare da interpretare e alcune circostanze sono solo delle ipotesi e non è detto che siano del tutto veritiere (ad esempio il comportamento dell'utente);
- si arriva, così, alla fase del situation assessment, in cui si rilevano le possibili situazioni riguardanti l'aggregazione di una o più evidenze, specificate tra i preprocessing prima definiti; le situazioni sono una serie di condizioni statiche e lo scopo è determinare se questi stati sono veri o falsi;
- lo step finale consiste nell'individuazione della causa delle anomalie, come combinazione di una o più situazioni precedentemente stabilite. Si ottiene cosi una stretta correlazione tra il fault verificatosi e la ragione più probabile per la quale si è manifestato.

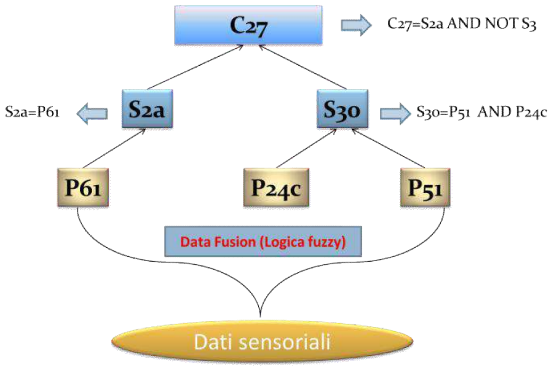


Figura 370. Schema funzionale del processo di data fusion per le anomalie della climatizzazione

Il risultato finale di questo processo è un valore sfumato tra zero ed uno che indica il grado di plausibilità (zero = plausibilità minima, uno = plausibilità massima) che si sia verificato un malfunzionamento imputabile alla causa in considerazione (nel caso specifico in considerazione C27=Fancoil accesi al di fuori degli orari di lavoro o in condizioni di assenza degli utenti).

Questa attività ha anche realizzato un'estensione del database della piattaforma integrata costruito nelle precedenti annualità[20] al fine di includere le funzionalità aggiuntive richieste.

Infine, in collaborazione con l'Università di Roma Tre [rapporto RdS/PAR2013/062], è stato sviluppato un modulo di controllo dei BEMS focalizzato sul monitoraggio delle misure dell'edificio e sull'attuazione real time del setting dei parametri del BEMS. L'implementazione di tale modulo di supervisione e controllo è tale da poter gestire un

[19] S.P. Corgnati, A. Capozzoli, F.Lauro, S.Pizzuti, D. Raimondo, N. Talà "Sviluppo di una metodologia per la diagnostica remota di reti di edifici integrata nella rete della pubblica illuminazione: applicazione su smart village C.R. Casaccia", PAR 2011 - rapporto RdS/2012/ 229.
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", PAR 2012 - rapporto RdS/2013/119.

[20] L. Sciavicco, S. Panzieri, G. Ulivi, F. Pascucci, C. Foglietta, F. Moretti, P. Cicolin, S. Pizzuti "Realizzazione di una piattaforma integrata per il data fusion di segnali provenienti da sistemi sensoriali per applicazioni di smart city integrate nella rete della pubblica illuminazione", PAR 2010 rapporto RdS/2011/323
P. Cicolin , F. Moretti, S. Panzieri, S. Pizzuti, "Realizzazione di una piattaforma integrata per il data fusion di segnali provenienti da sistemi sensoriali per applicazioni di smart city integrate nella rete della pubblica illuminazione", PAR 2011 rapporto RdS/2012/230

sistema edificio multi-zona con scambi termici ed in particolare ci si è focalizzati sul controllo delle temperature di set point dei termostati di stanza nel rispetto dei requisiti di comfort ambientale per gli occupanti.

Sviluppo diagnostica caso termico

In questa attività le logiche di diagnostica sviluppate in precedenza per la climatizzazione sono state estese al caso termico, attraverso il medesimo approccio che tiene conto degli indicatori di preprocessing, situation assessment e cause.

In particolare, in collaborazione con il Politecnico di Torino [rapporto RdS/PAR2013/061], sono state individuate le seguenti anomalie (cause):

- malfunzionamento del timer in centrale termica
- malfunzionamento sistema di controllo centrale termica
- malfunzionamento valvola di miscelazione del fluido di mandata in centrale termica
- staratura del termostato di stanza in periodo estivo
- malfunzionamento del sistema di climatizzazione (scorretta gestione della distribuzione del calore).

Successivamente, in collaborazione con l'Università di Roma Tre [rapporto RdS/PAR2013/062], sono state formalizzate le regole di data fusion che le individuano. Nella successiva annualità tale metodologia sarà implementata sulla piattaforma ICT Smart Village e sarà sperimentata sugli edifici pilota del C.R. Casaccia.

Validazione ed analisi dati

L'attività, descritta in dettaglio nel rapporto RdS/PAR2013/062, di validazione e analisi dei dati di monitoraggio iniziata nel 2012, si è concentrata sulla verifica della qualità dei dati di natura energetica, ambientale e gestionale provenienti dalla sensoristica installata all'interno degli otto edifici componenti il cluster (e connessa centrale termica del distretto). L'analisi dei dati è stata effettuata su un periodo di campionamento di un anno esatto (01 agosto 2013 - 31 luglio 2014). La verifica ha permesso di evidenziare che, a parte i dati di presenza di tutti gli edifici e le temperature interne dell'edificio F67, tutte le altre informazioni acquisite, sottoposte ad un opportuno processo di correzione, ove necessario, sono risultate attendibili ed elaborabili. Si conferma, dunque, con questa analisi la qualità del sistema di monitoraggio, che malgrado richieda ancora piccoli interventi di ottimizzazione già identificati, è migliorato grazie alle cicliche verifiche di qualità dei dati.

Inoltre, l'attività di elaborazione ed analisi dati si compone di più fasi che possono essere sintetizzate come di seguito:

- verifica dei bilanci energetici
- definizione e valutazione di nuovi Key Performance Indicators (KPI)
- caratterizzazione e clusterizzazione dei profili di consumo energetico
- elaborazione di dati ambientali in relazione ai consumi energetici.

In particolare, grazie alla rilevante quantità di dati provenienti dalla rete sarà possibile comparare le prestazioni degli edifici che ne fanno parte; a tal fine sono stati definiti nuovi Key Performance Indicators (KPI) appositamente ottimizzati per il modello della rete. In particolare, è stata estesa l'analisi sugli indicatori elettrici, sviluppata nel PAR 2012 (rapporto RdS/2013/121), al caso termico.

Sviluppo ed applicazione strumenti di visualizzazione integrata su Smart Village

Per lo sviluppo di sistemi di diagnostica remota e automazione avanzata di reti di edifici ENEA ha realizzato un'interfaccia grafica ad uso dell'energy manager tramite lo sviluppo di moduli software, commissionati alla società Harpa Italia, in grado di consentire la visualizzazione in tempo reale degli eventi all'interno dello Smart Village del CR Casaccia, in particolare afferenti alle tematiche esaminate: building, lighting e mobility.

Il sistema sviluppato [rapporto RdS/PAR2013/060] consente un monitoraggio avanzato grazie alla graficizzazione e rappresentazione dei seguenti elementi:

- flussi interni su grafi, i cui nodi sono gruppi di edifici, mentre gli archi rappresentano i percorsi pedonali del Centro (Figura 371);
- monitoraggio delle variabili misurate relative agli oggetti attivi, ovvero: 10 edifici, le torri faro del parcheggio, l'illuminazione del viale led, sia tramite tabelle che su mappa georeferenziata;
- segnalazione di anomalie dei moduli di diagnostica.

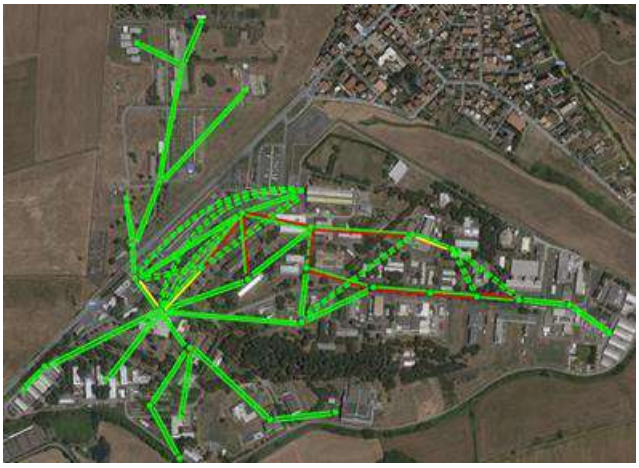


Figura 371. Visualizzazione flussi pedonali nel centro Casaccia - ENEA

Gestione ed upgrade infrastruttura Smart Village

La realizzazione del network di Smart building presso lo Smart Village Casaccia è stato intrapreso nei precedenti programmi di ricerca. Attualmente comprende 10 edifici dotati di sistemi di monitoraggio, controllo e trasmissione dati gestiti da remoto da una piattaforma centralizzata ed aperta, in fase di sviluppo presso ENEA, in grado di interagire con i differenti BEMS commerciali impiegati (Easycon - Umpi, Sem - Almaviva).

Nella presente annualità al fine di consentire la sperimentazione delle metodologie sviluppate e testate inizialmente su di un simulatore, è stato necessario un upgrade e customizzazione dei software, attraverso le ditte Almaviva e Umpi, di gestione dei BEMS installati per garantire la gestione ottimale degli edifici e per attuare le richieste di "active demand". In tal modo la piattaforma centralizzata è in grado di ricevere real time i dati dalla sensoristica installata ed inviare da remoto i comandi di accensione/spegnimento e settaggi di set point della rete di edifici. In particolare, la strumentazione installata garantisce il controllo da remoto delle utenze elettriche relative alle ventole dei fancoil e delle luci, mentre il monitoraggio e gestione delle singole utenze della linea forza motrice sarà garantito tramite diverse tipologie di smart plug, già selezionate e acquistate, e che verranno installate nella prossima annualità presso uno o più edifici pilota. Per quanto riguarda le utenze termiche, il controllo avviene a differenti livelli di dettaglio nei diversi edifici della rete, il sistema centrale è in grado di impostare la temperatura di mandata presso due centrali termiche tramite regolatori PID che controllano l'apertura delle valvole miscelatrici, mentre nell'edificio F40 è stata implementata la possibilità di gestire real time i termostati di stanza tramite invio orario dei comandi di controllo.

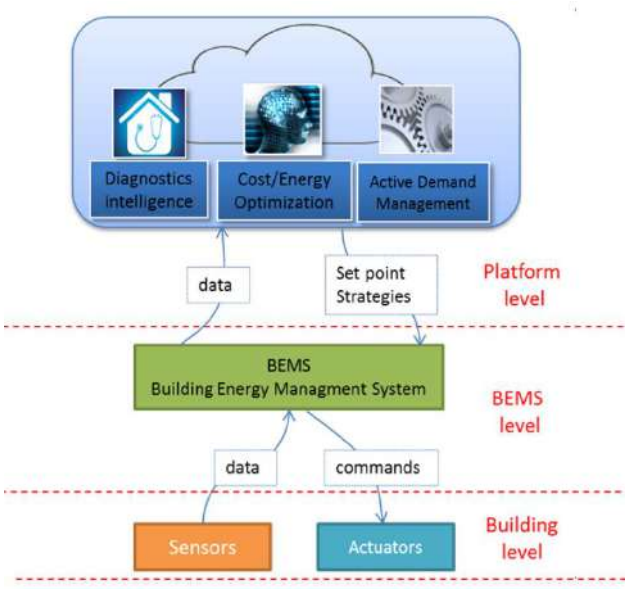


Figura 372. Architettura del sistema

Infine è stata svolta attività di aggiornamento e manutenzione hardware e software della griglia computazionale sulla quale poggiano tutti i servizi di Smart Village implementati.

Sperimentazione : diagnostica climatizzazione

La fase sperimentale è stata finalizzata a verificare la validità del metodo di diagnostica, definito in collaborazione con il Politecnico di Torino e l'Università di Roma Tre, sulla climatizzazione elaborando i dati relativi a tutto il periodo invernale, per avere un quadro chiaro e dettagliato sul comportamento energetico dell'edificio F40. Sono state riscontrate anomalie di consumo sistematiche e non, su tutti e tre i piani della palazzina associabili per la maggior parte ad inefficienze dell'impianto nel suo complesso e a comportamenti non sempre corretti degli

occupanti. Sono state effettuate analisi aggregando i dati per piano, per orario, per livello di gravità e per numero di anomalie gravi (> 0,8) per piano.

Nella Figura 373 viene riportato un esempio di rilevazione puntuale delle anomalie attraverso l'indicatore C27 (linea rossa), descritto in precedenza, comparato con il dato di potenza misurato (linea blu) e la percentuale di occupazione del piano. Tutte le grandezze sono state normalizzate tra zero ed uno per poterle rendere facilmente visualizzabili e comparabili. Dalla figura si può notare che nel periodo preso in considerazione (circa 24 ore) si sono verificate tre anomalie (fault) di una certa gravità (0,7, 0,95 e 0,89) considerando che il massimo è uno.

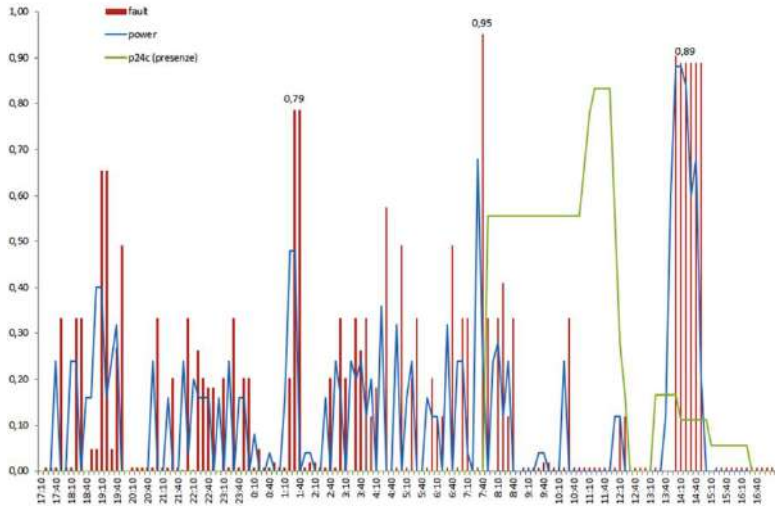


Figura 373. Esempio individuazione anomalie puntuali

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti nelle attività svolte da ENEA è contenuta rapporto RdS/PAR2013/060

b.2 Sviluppo e validazione su simulatore di metodologie per active demand

L'obiettivo di questa attività, svolta in collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, prevede l'implementazione del modello di active demand teorizzato nella precedente annualità [rapporto RdS/2013/119] attraverso metodologie per la modulazione dell'erogazione dell'energia in funzione della domanda che diviene parte attiva del sistema in quanto resa flessibile e adattabile.

A tal fine, nella precedente annualità [rapporto RdS/2013/120], è stato sviluppato un simulatore in MATLAB/Simulink dei consumi termici in grado di riprodurre differenti strategie di controllo sia a livello di singolo edificio che di rete di edifici grazie all'impostazione automatica dei set point di temperatura (termostati di stanza e centrale termica) dei BEMS installati. In questa annualità sono state migliorate alcune funzionalità del simulatore termico; la prima consente di poter simulare anche situazioni di carico parziale della centrale termica/frigorifera, la seconda riguarda la modellazione dei consumi elettrici integrati con quelli termici simulando il controllo dell'accensione e spegnimento dei fan-coil e la dimmerazione dell'illuminazione indoor.

Inoltre, è stato effettuato l'assessment del simulatore; ovvero, a partire dai dati sperimentali degli edifici monitorati nello Smart Village, è stata effettuata una calibrazione del simulatore al fine di conseguire una migliore corrispondenza tra il modello ed il comportamento reale degli edifici.

Il simulatore è stato integrato con gli algoritmi di ottimizzazione sviluppati nella precedente annualità [rapporto RdS/2013/122] in un ambiente unico. Questi ultimi forniscono al simulatore i valori delle variabili di controllo (es. set point temperature) il quale fornisce al modulo di ottimizzazione i dati per il calcolo delle funzioni di costo le quali, insieme ai dati relativi alle condizioni al contorno, procede all'ottimizzazione multiobiettivo minimizzando il discomfort degli utenti e minimizzando i consumi energetici.

Infine, la sperimentazione ha riguardato la comparazione di diversi scenari a partire dal caso di riferimento reale ed ha mostrato che ci sono margini di risparmio potenziali molto interessanti (circa il 20%).

Upgrade simulatore termico

In questa annualità [rapporto RdS/PAR2013/063] sono state migliorate alcune funzionalità del simulatore termico/elettrico (sia nella versione edificio singolo che in quella cluster di edifici) sviluppato in precedenza. Nel

PAR 2012 la centrale termica/frigorifera era stata simulata ipotizzando un rendimento medio annuo costante sia per la caldaia che per il gruppo frigorifero; il simulatore della centrale termica/frigorifera è stato migliorato facendo variare il rendimento in funzione del fattore di carico e delle condizioni ambientali esterne. Inoltre, sono stati modellati i consumi elettrici integrandoli con quelli termici simulando il controllo dell'accensione e spegnimento dei fan-coil e la dimmerazione dell'illuminazione indoor.

Nella prossima annualità sarà inserito anche il costo dell'energia come condizione al contorno, sia attraverso scenari tariffari flat, biorari o di dynamic pricing su base oraria.

Tuning su dati reali

La seconda linea di attività [rapporto RdS/PAR2013/063] è consistita nella valutazione del simulatore a partire dai dati sperimentali degli edifici monitorati al fine di conseguire una migliore corrispondenza tra il modello ed il comportamento reale degli edifici. Inoltre, il simulatore è stato predisposto per essere integrato con algoritmi di ottimizzazione in modo da arrivare ad una ottimizzazione multiobiettivo che minimizzi sia il discomfort degli utenti sia i consumi energetici.

In particolare, l'attività di tuning è consistita principalmente nella validazione del simulatore applicato all'edificio F40 per un periodo di riferimento di 60 giorni individuato nel primo trimestre 2013; inoltre è stata affrontata una primissima fase di valutazione del simulatore per il cluster di edifici. Per l'edificio F40 l'errore medio percentuale assoluto giornaliero si attesta intorno al 7%; togliendo le prime ore di transitorio iniziale della simulazione, l'errore relativo massimo risulta inferiore al 5% e quello medio inferiore al 3%. Tali risultati fanno si che questo strumento possa essere efficacemente usato nel modello di controllo attivo della domanda teorizzato (ottimizzazione giornaliera descritta nei prossimi paragrafi).

In conclusione, il tuning del simulatore su dati reali può essere definito soddisfacente. Tuttavia questo è soltanto un primo importante passo; il processo di tuning dovrà continuare attraverso un monitoraggio continuo rispetto ai dati acquisiti. I prossimi step potranno essere il test della prossima stagione invernale e quelli sulla stagione estiva trascorsa, appena saranno disponibili tutti i dati necessari per il funzionamento del simulatore. Tutto ciò sarà oggetto delle attività nella successiva annualità.

Integrazione con algoritmi di ottimizzazione

L'obiettivo di questa attività è stato l'implementazione, in ambiente MATLAB, della strategia di ottimizzazione multi-obiettivo sviluppata nella precedente annualità, applicabile ad edifici intelligenti, finalizzata a minimizzare sia il consumo energetico sia la percentuale di occupanti insoddisfatti causata da "discomfort" termico (PPD). Lo studio si è basato sull'utilizzo e l'integrazione del simulatore in ambiente MATLAB/Simulink che, a partire dalle condizioni climatiche esterne (temperatura, umidità, velocità del vento, ecc.), dalle caratteristiche strutturali dell'edificio F40 e dalle impostazioni dei termostati interni all'edificio stesso, ha permesso di prevedere sia i consumi, in termini di metri cubi di metano, sia le condizioni termo-igrometriche interne. L'integrazione è consistita nel rendere il simulatore facilmente richiamabile dall'ottimizzatore ogni qualvolta quest'ultimo aveva la necessità di valutare una nuova soluzione. Ovvero, ogni volta che l'ottimizzatore deve valutare una nuova configurazione di set point questi vengono passati al simulatore il quale restituisce come risultato i valori di consumi e comfort.

Sperimentazione: ottimizzazione invernale su simulatore

Sono state effettuate sperimentazioni in un periodo che abbraccia buona parte della stagione per un totale di 89 giorni. Ogni sperimentazione ha previsto il cambiamento del set-point di temperatura del fluido termovettore e del set-point di temperatura del termostato nelle zone climatizzate in range specifici. Sono state analizzate diverse strategie prendendo a riferimento le impostazioni reali dell'edificio F40 e la strategia ottimale si rivelata essere quella con riscaldamento attivo nelle ore lavorative (7:00-19:00) con set-point variabili giornalmente poiché, grazie al controllo dinamico delle temperature di set-point giornaliere, ha permesso di ottenere un risparmio energetico "teorico" del 19,2%, rispetto al caso di riferimento, a fronte di una percentuale di insoddisfatti (PPD) del 9%, in perfetto accordo con la soglia massima imposta dalla normativa (10%).

Nella successiva annualità tali risultati saranno dapprima estesi anche al caso estivo e successivamente si procederà anche alla sperimentazione sugli edifici pilota. Inoltre, come ulteriore funzione di ottimizzazione si introdurrà anche il costo dell'energia e come variabili di ottimizzazione si considererà anche la dimmerazione delle luci.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti nelle attività svolte da ENEA è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/060.

Tabella 99. Riepilogo risultati sperimentali di ottimizzazione invernale

APPROCCIO	RIFERIMENTO	OTTIMIZZAZIONE STAGIONALE	OTTIMIZZAZIONE STAGIONALE	OTTIMIZZAZIONE GIORNALIERA
RISCALDAMENTO ATTIVO	24 ore	7.00-19.00	7.00-19.00	7.00-19.00
SET-POINT MANDATA [°C]	65 (stagionale)	52 (stagionale)	41 (stagionale)	Giornaliero
SET-POINT TERMOSTATO [°C]	21 (stagionale)	21,5 (stagionale)	21,5 (stagionale)	Giornaliero
PPD MEDIO STAGIONALE [%]	**6,1**	**6,1**	**9,1 (73% fuori normativa)**	**8,9 (PPD_{max} = 9,8: sempre entro normativa)**
CONSUMO DI GAS STAGIONALE [m^3l	8419	7821	6841	6801
RISPARMIO ENERGETICO [m^3]	-	598	1578	1618
RISPARMIO ENERGETICO [%]	**-**	**7**	**18,7**	**19,2**
CO, EVITATA [kg]	-	1136	2998	3074

b.3 Partecipazione ai network di ricerca europei

Il tema della gestione ottimale di reti edifici è strettamente connesso con le reti di ricerca europee sulle smart cities di cui ENEA è membro e dove in alcuni casi svolge un ruolo di coordinamento, come nel "Joint Program EERA Smart City", la "Smart City Stakeholders Platform", il "JPI Urban Europe", la "Member State Smart City Initiative" ed il "Covenant of Mayors".

In particolare ENEA svolge un'attività di coordinamento di un sotto programma denominato Urban Energy Networks, nel contesto del Joint Programme on Smart Cities (JPSC), nell'ambito dell'European Energy Research Alliance (EERA).

Il JPSC ha l'obiettivo di favorire una politica atta a migliorare l'efficienza energetica e l'integrazione delle risorse energetiche rinnovabili nelle aree urbane. Il programma prevede lo sviluppo di strumenti e metodologie scientifiche che facilitino e stimolino piani d'intervento, progetti e attività intelligenti del "sistema energia" in ambiti urbani. Al fine di raccogliere ed elaborare il maggior numero possibile di progetti realizzati fino ad oggi in tutti gli Stati Membri partecipanti alla JPSC, è stata sviluppata l'idea di creare una piattaforma di tipo aperto per la registrazione di informazioni utili allo scopo.

Nella scorsa annualità [rapporto RdS/2013/119] è stata effettuata l'analisi delle k-word da utilizzare nella piattaforma a cui attribuire valore in un'ottica di definizione di indicatori e descrittori dei progetti di ricerca. La fase successiva comporta la definizione del modello dati che permetterà la raccolta delle informazioni citate e fornirà la base dati per le sviluppo di profili di interrogazione standardizzati. In questa annualità si è proceduto, grazie all'attività sviluppata in collaborazione con il Consiglio italiano per le Scienze Sociali (CSS), allo sviluppo dei profili necessario per avviare una attività di screening sui principali elementi che caratterizzano possibili dinamiche urbane concentrandosi sulle definizioni internazionali di Social Innovation e definendo i target delle politiche di riferimento, i driver di trasformazione e le tecnologie abilitanti.

Infine, la disseminazione scientifica dei risultati è stata realizzata oltre che con la partecipazione a network internazionali anche attraverso la presenza a convegni e workshop in cui sono stati presentati i risultati ottenuti. In particolare, il progetto 'Smart Village' è risultato vincitore del premio "Smart Cities Road Show" in occasione dell'evento SMAU Roma "per aver realizzato un progetto innovativo e per essere un esempio virtuoso nello sviluppo delle moderne città intelligenti".

Una descrizione dettagliata dei risultati delle attività svolte da ENEA è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/060.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

c.1 Sperimentazione con materiali TAT per OLED

La presente linea di attività è concentrata sui dispositivi luminescenti realizzati tramite l'impiego di materiali organici (OLED) e in particolare sulla sintesi e la sperimentazione di materiali innovativi, in particolare la famiglia dei triazatruxeni (TAT), per ottenere migliori prestazioni ed efficienza.

Utilizzando i materiali sviluppati nell'ambito della collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli "Federico II", e più avanti descritti, sono stati realizzati dispositivi OLED.

L'attenzione di ENEA è stata focalizzata sullo studio della struttura dei dispositivi che fosse più adatta per massimizzare le potenzialità del nuovi materiali triazatruxeni (TAT) sintetizzati. In particolare, nella struttura OLED applicata, l'anodo è costituito da un film sottile di ITO (indium tin oxide) depositato per sputtering, il catodo da film sottili di calcio ed alluminio (Ca/Al) depositati per evaporazione termica partendo da pressioni di partenza dell'ordine di 10^{-8} mbar, lo strato iniettore di lacune è costituito da PEDOT:PSS depositato per spin coating. Lo strato emissivo è stato depositato mediante spin coating, utilizzando una miscela (blend) di TAT e di polivinilcarbazolo (PVK). Lo strato bloccante per le lacune è una batocuprina (BCP), lo strato trasportatore di elettroni è idroquinolato di alluminio (Alq3). Tutti questi materiali sono depositati per evaporazione termica in ultra alto vuoto.

I dispositivi hanno mostrato ottime prestazioni. Infatti, la tensione di accensione dell'OLED è di circa 3,5 V, ed il dispositivo emette con intensità di circa 1500 cd/m^2 a 9 V.

c.2 Progettazione e sperimentazione di installazioni efficienti a LED

Il presente subtask è stato finalizzato allo sviluppo di un sistema di illuminazione per l'industria, per valutare l'impatto e possibili scenari applicativi delle nuove tecnologie. Questo comprende anche la sperimentazione del sistema HumbleBee (progettato nella scorsa annualità), e in parallelo studi sugli effetti della luce sull'attenzione e sulla vigilanza nonché sul problema della resa dei colori legato alle nuove sorgenti, sperimentazione di sistemi di informazione geografica (GIS) per mappatura della pubblica illuminazione in Italia e infine la partecipazione a lavori normativi e l'attività a livello europeo sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica.

Il sistema HumbleBee è stato installato presso l'ENEA, ma successivamente si sono verificati problemi imprevisti, che hanno di fatto richiesto un tempo superiore al previsto per il commissioning e i primi controlli, in quanto è stato necessario identificare le cause dei problemi e trovare soluzioni soddisfacenti. Sono quindi state valutate diverse possibilità e sono state individuate e definite nuove configurazioni tecniche, alcune delle quali in fase di installazione, per garantire il funzionamento corretto dell'impianto e facilitare le modifiche al sistema in funzione di miglioramenti dal punto di vista fotometrico e per attività di ricerca sui sistemi di controllo.

Illuminazione efficiente nell'industria e sperimentazione HumbleBee

E' stata svolta dal Politecnico di Milano Dipartimento di Design [rapporto RdS/PAR2013/065] una ricerca con lo scopo di valutare l'impatto e possibili scenari applicativi delle nuove tecnologie LED nell'Illuminazione industriale: in questo ambito di impiego, aspetti importanti investono la produttività dei lavoratori, il comfort visivo in termini di corretti livelli di illuminamento, contenimento dell'abbagliamento e dei segni di affaticamento dei lavoratori. Una migliore illuminazione può contribuire a ridurre il rischio di incidenti, migliorare l'efficienza dei controlli visivi sulle lavorazioni e aumentare l'efficienza di produzione.

In questo contesto di applicazione specifico, la tecnologia LED presenta notevoli vantaggi rispetto alle sorgenti di tipo tradizionale: consente di ridurre gli interventi di manutenzione (che determinano interruzioni durante l'attività lavorativa), consente una maggiore flessibilità di utilizzo (dimming per la regolazione dei livelli di illuminamento, diversa temperatura di colore in funzione del compito visivo, accensione istantanea degli apparecchi, interfaccia con sensori di luminosità e di presenza) e offre nuove possibilità di controllo e gestione digitale molto sofisticate dell'impianto attraverso interfacce intuitive e di facile utilizzo.

Il fine ultimo del progetto di ricerca è quello di giungere alla definizione di un sistema di illuminazione per applicazioni in ambito industriale che risponda a criteri di risparmio energetico, ridotta manutenzione, miglioramento del comfort visivo dei lavoratori.

Il lavoro si è articolato attraverso le seguenti fasi:

- Definizione dei requisiti per un sistema di illuminazione per ambienti industriali, in termini di performance luminosa (livelli di illuminamento, uniformità, contenimento dell'abbagliamento) e di temperatura di colore, resa cromatica. L'attività è stata svolta attraverso delle valutazioni e comparazioni tra diverse soluzioni tecnologiche disponibili sul mercato.
- Completamento del "motore luminoso" (HumbleBee) precedentemente sviluppato da ENEA per il proprio Laboratorio, con particolare attenzione alla progettazione del sistema ottico al fine di ottimizzarne la distribuzione luminosa e l'efficienza, ma garantendo allo stesso tempo il contenimento dell'abbagliamento e un soddisfacente livello di comfort visivo.
- Studio delle problematiche dell'interfaccia di controllo del sistema (accensione spegnimento di tutti o i

singoli centri, regolazione dell'intensità del singolo centro) al fine di ottenere un sistema efficace ed intuitivo, anche per personale non-esperto.

- Proposta del concept di un sistema di illuminazione che integri le funzioni di illuminazione generale (vedi punto precedente) e quella di illuminazione localizzata per una postazione di lavoro tipo.

ENEA ha svolto in parallelo la ricerca attraverso la progettazione, realizzazione e monitoraggio di un sistema innovativo di illuminazione – denominato HumbleBee - in un ambiente reale, costituito da una zona dell'edificio ENEA di Ispra [rapporto RdS/PAR2013/071].

Il locale-laboratorio dove è stato installato e testato HumbleBee, è un modulo di edificio di tipo industriale (grande locale, altezza elevata, finestratura alta ecc. ecc.), ma con utilizzi diversi dall'industriale, in quanto vi si svolgono attività di ricerca sperimentale, quindi con compiti visivi particolari e requisiti illuminotecnici corrispondenti (Figura 374).

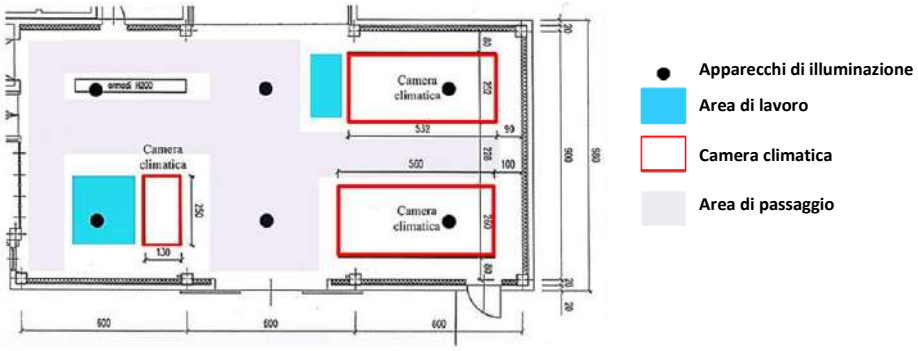


Figura 374. Hall tecnologica - laboratorio ICELAB - FIRELAB, sede della sperimentazione con il sistema HumbleBee

Nell'annualità precedente è stato progettato il nuovo impianto, scegliendo la tecnologia: apparecchi di illuminazione a fosfori remoti e un sistema di controllo smart wireless per la gestione dell'impianto di illuminazione.

In Figura 375, il motore luminoso: si vede il dissipatore e il vetro con i fosfori remoti. Il sistema di illuminazione HumbleBe è così caratterizzato[21]:

- n° 6 apparecchi di illuminazione (prototipi) con tecnologia a fosfori remoti con installazione a plafone (all'altezza di circa 7 metri dal pavimento), con sensori presenza, dispositivi elettronici per la comunicazione wireless e l'antenna. L'impianto è progettato per garantire un illuminamento medio mantenuto sul piano di lavoro (altezza di 1 metro) di 300 lx;
- un sistema di controllo Smart wireless (protocollo ZigBee) dedicato per la gestione e la regolazione manualmente ed automatica degli apparecchi di illuminazione. Il sistema consente la memorizzazione di parametri elettrici, malfunzionamenti, valori di illuminamento, stati di presenza, interazioni manuali con il sistema, per consentire una completa valutazione del funzionamento e dei consumi energetici del sistema.

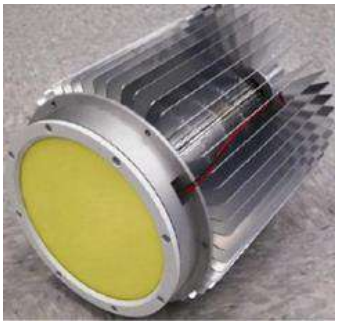


Figura 375. High Bay prototipale, parte centrale del prodotto finale

Le logiche di controllo del sistema HUMBLEBEE sono:

logica di controllo manuale	▪ accensione/spegnimento degli apparecchi di illuminazione ▪ dimmerazione del flusso luminoso emesso dalle sorgenti luminose ▪ regolazione della Temperatura di Colore delle sorgenti luminose (T_C[22])
logica di controllo automatica	▪ accensione/spegnimento degli apparecchi di illuminazione per mezzo di sensori di presenza ▪ dimmerazione del flusso luminoso emesso dalle sorgenti luminose per mezzo di fotosensori

[21] L. Blaso, O. Li Rosi, S. Fumagalli, G. Leonardi, V. Tarantini, R. Pollidori, E. Rusconi, A. Frascone, A. Antonelli "Metodi sperimentali per la valutazione della qualità della luce, sviluppo di sistemi a LED", RdS/2013/114

[22] Colour Temperature: Tratto dal vocabolario della CIE "temperature of a Planckian radiator whose radiation has the same chromaticity as that of a given stimulus [K]"

Nella versione originale, si è scelto di non inserire sistemi ottici addizionali per direzionare la luce nell'ambiente; l'emissione della sorgente (vetro) è quindi a sua volta Lambertiana con apertura 115° del fascio luminoso. Gli apparecchi sono stati realizzati dalla ditta NERI con componenti Intematix.

Lo studio di ottiche addizionali è stato oggetto di ricerca nella presente annualità e ha portato alla progettazione, da parte del Politecnico di Milano Dipartimento di Design, di un riflettore in alluminio In Figura 376, il rendering dell'apparecchio HumbleBee con il riflettore.



Figura 376. Rendering HumbleBee con il riflettore

Per la presente annualità, la programmazione originale prevedeva il completamento della fase realizzativa del sistema HumbleBee. Il sistema doveva quindi essere sottoposto ad una delicata fase di commissioning e taratura, propedeutica alla fase effettiva di messa in servizio e monitoraggio dei parametri energetici ed ambientali. Era pertanto prevista la sperimentazione sul campo, e in parallelo l'effettuazione di test di laboratorio su un esemplare dell'apparecchio di illuminazione, per testarne, in modo parametrico, prestazioni illuminotecniche ed elettriche in condizioni di riferimento.

Il nuovo sistema è stato realizzato nel marzo 2014. Si è scelto di installare nel laboratorio 5 apparecchi, invece dei 6 previsti in origine, e di dedicare il sesto apparecchio ai test fotometrici e illuminotecnici. Da simulazioni effettuate in precedenza, si è visto che anche con 5 apparecchi i requisiti illuminotecnici vengono rispettati, in quanto la modifica riguarda la zona del laboratorio dove sono posizionate le due grandi camere climatiche e l'area di lavoro effettiva si limita al "corridoio" tra le due camere stesse. In Figura 377, il locale prima dell'intervento e dopo l'installazione del nuovo impianto.



Figura 377. Hall tecnologica con vecchio e il nuovo impianto

L'installazione è stata eseguita a cura della ditta Neri (fornitrice degli apparecchi e del controller locale). Per il sistema di controllo, erano previsti due computer: un controller locale e un server remoto. Per quest'ultimo si è scelta l'opzione di "server virtuale", ospitato su una macchina ENEA di UTICT. Purtroppo si sono presentati una serie di problemi informatici imprevisti, relativi alla comunicazione fra gli elementi del sistema che hanno richiesto l'intervento di personale tecnico specializzato per la loro risoluzione.

D'altra parte anche la successiva analisi dei risultati di una prima campagna di test ha evidenziato delle anomalie:

- in certe condizioni ambientali i punti luce lampeggiano con una frequenza di circa 2 Hz;
- il sistema controller non ha mai registrato correttamente i dati di consumo, a causa di incompatibilità fra il protocollo di comunicazione progettato dal fornitore e le risposte fornite dal controller DALI della Harvard installato negli apparecchi.

In seguito ai problemi riscontrati nel sistema Humblebee, non ancora risolti, e allo scopo di ricavare dati più precisi riguardo le prestazioni elettriche e luminose, si è deciso di smontare il sesto apparecchio (quello tenuto a disposizione per le prove di laboratorio). Lo smontaggio dell'apparecchio ha evidenziato diverse importanti lacune implementative:

- problemi di fissaggio della flangia che chiude il vetro trattato con i fosfori remoti, con possibile rischio di caduta dell'assieme flangia + vetro, pericolosa e costosamente dannosa;
- nella cavità ottica non è stato installata la camera di miscelazione, elemento fondamentale per la corretta emissione di luce dall'apparecchio; in questo modo i rendimenti ottici (anche se ancora da misurare) sono decisamente inferiori alle prestazioni teoriche;
- si è verificato il distacco tra modulo led e modulo e col controller DALI (probabile problema di saldature

fredde);
- evidente danno da urto sulla piastra del dissipatore, con conseguente riduzione della superficie di scambio termico;
- la superficie di scambio della cavità dove sono installati i moduli LED ha una lavorazione troppo grezza che limita in modo non precisamente quantificabile, ma sensibile la capacità di trasmettere calore al dissipatore.

In questa situazione, si è deciso di procedere su diverse linee parallele:

- la "riparazione" degli apparecchi, per quanto riguarda aspetti meccanici, infrastrutturali e ottici (da richiedere al fornitore): al momento non si sa se anche gli altri apparecchi presentano gli stessi problemi di quello smontato;
- lo studio e l'implementazione di sistemi di controllo alternativi, per arrivare al risultato con soluzioni più semplici. Questa ultima linea prevede di poter testare in scala reale diverse soluzioni tecnologiche disponibili sul mercato o oggetto di nuovo sviluppo esse stesse. Questo nuovo studio è iniziato e verrà svolto da ENEA, utilizzando anche i risultati della ricerca condotta dal Politecnico di Milano (ad esempio per le interfacce). Fino a oggi sono stati contattati diversi fornitori e si stanno esaminando le proposte (prodotti già disponibili e utilizzabili ed elementi da sviluppare, necessità si sostituzione di componenti negli apparecchi, ecc.);
- la definizione di specifiche per rendere facilmente modificabile il sistema di apparecchi (ad esempio con "saliscendi" utili per lavorare sugli apparecchi a livello pavimento e non a 7 m di altezza);
- la predisposizione per la prototipazione del riflettore, come proposto dal Politecnico di Milano, per aumentare le prestazioni fotometriche degli apparecchi.

Misure di resa cromatica

Questa attività è stata svolta in parte da Università di Milano Dipartimento Informatica, in parte da ENEA [rapporti RdS/PAR2013/066 e RdS/PAR2013/071].

Il lavoro ha lo scopo di studiare approcci classici e alternativi all'indice di resa cromatica (CRI, indice che misura quanto una sorgente luminosa preservi l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa), che ha lo scopo di valutare la bontà nella resa cromatica di una sorgente di luce. Recentemente l'introduzione di nuove sorgenti illuminanti a LED, ha mostrato i limiti di tale metodo. Infatti, l'attuale CRI restituisce valori bassi per i nuovi illuminanti, anche se questi sono caratterizzati da una buona resa cromatica. L'affidabilità di questo indice è quindi bassa per quanto riguarda una fascia di mercato in forte crescita come quello dei sistemi di illuminazione basati su LED. Questo ha portato molti gruppi di ricerca a studiare nuovi metodi per la valutazione delle sorgenti di luce.

Nel lavoro dell'Università di Milano si introduce il concetto di apparenza cromatica indicandone l'importanza nel calcolo del CRI e si presenta l'elaborazione dei dati raccolti durante l'attività sperimentale svolta in precedenza, con l'obiettivo di testare in che misura i cambiamenti del contesto della scena possano alterare la stabilità della resa cromatica. Il gruppo di Milano ha eseguito l'attenta elaborazione dei dati e l'analisi critica dei risultati (quest'ultima parte in stretta collaborazione con il gruppo ENEA).

L'attività sperimentale svolta è stata così articolata:

- *TEST DI PERCEZIONE VISIVA - PARADOSSO DI ALBERS*: Il test è stato eseguito in due differenti serie presso il laboratorio dell'ENEA di Ispra. L'obiettivo del test è valutare eventuali direzioni di miglioramento nel calcolo del CRI considerando ad esempio il contesto nel calcolo del suo valore. Questa attività, svolta quasi interamente lo scorso anno, ha visto la ripetizione dei test anche nella presente annualità (con un numero ridotto di utenti) per risolvere alcune criticità emerse dall'attenta analisi dei risultati effettuata dal gruppo dell'Università di Milano in collaborazione con l'ENEA.

  Le modifiche apportate per risolvere le criticità emerse sono:

  - *rispetto alla criticità "stampa delle patch":* avendo riscontrato difformità di stampa delle patch, si è deciso di utilizzarne una sola serie e fare in modo che l'utente effettuasse singolarmente il test (non più 4 utenti alla volta che a rotazione partecipavano alla stessa sessione di test) utilizzando sempre lo stesso insieme di 4 fogli, che veniva di volta in volta spostato nei diversi box con le diverse lampade, in modo che non vi fosse differenza nelle patch;

    rispetto alla criticità "task": come specificato, agli utenti era chiesto di essere spontanei ed evitare ragionamenti cognitivi (ad esempio sul fatto che le patch potessero essere uguali), cercando di mantenere la valutazione dell'osservatore al più basso livello possibile. Analizzando i primi dati, si è capito quanto

fosse impegnativo il test, sia perché le patch da valutare erano molte (19) e si trovano in un sottospazio colore piuttosto ristretto, sia perché il test richiedeva un tempo abbastanza lungo, dovendo essere ripetuto 7 volte: una per ogni sorgente di luce da testare.

La difficoltà del test probabilmente portava anche a mettere in atto delle strategie di ricerca da parte degli utenti. Alcuni osservatori dopo il test hanno dichiarato che la ricerca della patch comincia partendo in alto a sinistra e seguendo il modo di lettura (scandendo da sinistra a destra, dal basso al basso) fino a trovare una patch che assomigli a quella che si sta cercando, spesso senza continuare la ricerca o facendolo con minore attenzione.

Per questi motivi, la prima azione effettuata per risolvere la criticità del task è stata quella di disporre i box in maniera differente in modo da consentire all'utente di effettuare il test rimanendo in piedi davanti al box e spostandosi, secondo la sequenza definita, da un box all'altro (Figura 379). La nuova postura è stata più rilassante e i test sono stati eseguiti in generale in tempi più rapidi rispetto alla prima serie (alcuni degli utenti che avevano effettuato il test durante la prima serie l'hanno ripetuto nella seconda per permetterci di verificare gli effetti migliorativi delle nuove modifiche del protocollo).

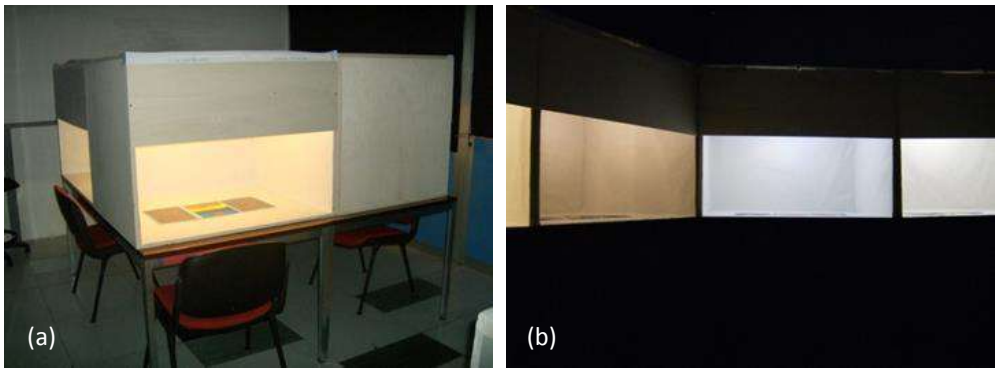


Figura 378. Setup dell'esperimento nella prima serie (a) e nella seconda serie (b)

- *TEST DI PERCEZIONE VISIVA – OGGETTI BIDIMENSIONALI (MACBETH COLOR CHECKER) E TRIDIMENSIONALI (MODULI LEGO):* ripartendo da una esperienza condotta alcuni anni fa nell'ambito della percezione visiva, è stata programmata una nuova attività sperimentale, per estendere il test a un numero maggiore di sorgenti luminose, con l'obiettivo di valutare il CRI di sorgenti commerciali durante l'osservazione di un compito visivo bidimensionale (rettangolo colorati) e tridimensionale (LEGO). Per questa nuova serie di test è stato definito il protocollo in collaborazione con l'Università di Milano e sono stati allestiti i box presso il Laboratorio dell'ENEA di Ispra.

  L'esperimento definito è composto, da due fasi (la prima è stata svolta nella presente annualità, mentre la seconda sarà oggetto delle attività del terzo anno):

  - *Fase uno*: in questa fase gli utenti devono svolgere come compito visivo l'osservazione di un oggetto bidimensionale "un Macbeth Color Checker" appoggiato al fondo di ogni box una inclinazione di 45°. Questo oggetto viene confrontato con quello posto nel box di riferimento, all'interno del quale è installata una sorgente alogena (sorgente di riferimento), per verificare quali siano le variazioni di colore percepite dall'osservazione sotto sorgenti differenti.
  - *Fase due*: in questa fase gli utenti devono svolgere come compito visivo l'osservazione di un oggetto tridimensionale "un Transformer" realizzato con i LEGO colorati e collocato al centro di ogni box, orientato a 45. Il Transformer sarà confrontato con quello posto nel box di riferimento, all'interno del quale sarà installata una sorgente alogena (sorgente di riferimento) per verificare quali siano le variazioni di colore percepite dall'osservazione sotto sorgenti differenti.

Effetti di sorgenti innovative sull'attenzione e la vigilanza

Questa attività è stata svolta essenzialmente dall'Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE). Lo studio prosegue ed approfondisce l'indagine della scorsa annualità, che aveva riguardato effetti non-visivi dell'illuminazione sulle funzioni cognitive umane. Quest'anno la ricerca ha investigato i potenziali effetti di uno spettro luminoso ricco di lunghezze d'onda corte sull'attenzione e quindi l'influenza sulla vigilanza dell'individuo. Due test di vigilanza, uno con compiti visivi e uno con compiti

acustici, sono stati eseguiti da 40 soggetti all'interno di un box sperimentale con due scenari luminosi dalla differente composizione spettrale: sorgenti LED e lampade alogene.

I risultati mostrano un effetto differente delle due sorgenti sulle prestazioni dei partecipanti dovuto alla diversa composizione spettrale. Mentre con le sorgenti alogene si riscontra un naturale decremento di vigilanza sia acustica che visiva, dovuto a un incremento dei tempi di reazione durante le prove, la sorgente LED influenza positivamente le prestazioni dei soggetti, aumentando la vigilanza visiva e incrementando i tempi di reazione della vigilanza acustica.

Il confronto dei risultati ottenuti con quelli presentati nello studio svolto lo scorso anno sembrerebbe indicare come lo spettro luminoso del LED influenzi le funzioni attentive di tipo visivo; tuttavia, ulteriori studi sono necessari per determinare l'esistenza un effetto significativo sulle funzioni uditive.

Attività normative e delegazione italiana per le Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica

ENEA ha partecipato a lavori normativi in Italia al CEI e in UNI.

In particolare le attività in CEI sono state per il CT 315-GL 4, con l'obiettivo di verificare la fattibilità di realizzare un Tool semplificato, che sia di supporto ai professionisti, per eseguire un primo calcolo di massima delle prestazioni energetiche degli impianti di illuminazione artificiale degli edifici.

In UNI la partecipazione è stata per lo sviluppo di norme nei seguenti GL (oltre che in Commissione):

Gruppo	
U290001	Termini generali e criteri di qualità - Definizioni
U290002	Illuminazione degli ambienti di lavoro e dei locali scolastici
U290007	Fotometria e colorimetria
U290005	Illuminazione stradale (misto Luce e illuminazione/Costruzioni stradali ed opere civili delle infrastrutture)
U290006	Illuminazione gallerie
U290010	Risparmio energetico negli edifici
U290011	Luce diurna

Inoltre ENEA fa parte della delegazione italiana per le attività presso la Commissione Europea per le Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica. Vengono seguiti i diversi gruppi di prodotti oggetto di queste DIrettive. In particolare, per l'illuminazione, è in corso la revisione della fase 6 dei requisiti di ecodesign per le lampade del settore domestico, oggetto del Regolamento 244/2009.

Inoltre ENEA fornisce supporto tecnico al Ministero dello Sviluppo Economico per la sorveglianza di mercato per la Direttiva Etichettatura Energetica: quest'ultima attività è stata svolta nel Progetto C.2 , **"**Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico" (obiettivo f).

Sistemi di informazione geografica per la pubblica illuminazione

Si è iniziato a sviluppare una procedura che permette l'analisi e la visualizzazione delle informazioni raccolte nell'ambito del progetto Lumière [rapporto RdS/PAR2013/068].

Partendo dai dati raccolti nel progetto Lumière e facendo riferimento alle informazioni ISTAT su base territoriale reperibili in rete (sito: http://www.istat.it/it/strumenti/cartografia), i dati vengono tutti inseriti in un database (MS Access 2013) ed elaborati per estrarre le informazioni da rappresentare con software GIS (Quantum GIS, versione 1.8.0 Lisboa).

Allo stato attuale, l'introduzione dei dati su database, la loro analisi e la successiva visualizzazione mediante software GIS avvengono su PC locale e sono gestite manualmente. Tuttavia, c'è la possibilità di automatizzare il processo e di sviluppare procedure su Web server e interfacciamenti remoti che permettano a terzi di visualizzare le informazioni sui parametri d'interesse del progetto Lumière.

Utilizzando le informazioni ISTAT fino al 31 dicembre 2013, si è scelto inizialmente di rappresentare i seguenti comuni Italiani:

- comuni nella fascia compresa fra i 5.000 e i 50.000 abitanti, inizialmente invitati a partecipare al Progetto Lumière;
- comuni invitati per appartenenza a gruppi virtuosi e aderenti al progetto Lumière tramite associazioni, provincie, agenzie del territorio (Associazione Città Slow, Associazione Comuni Virtuosi, Comuni Agenda 21, Comuni Kyoto, Provincia La Spezia, Sosvima, ecc.);
- comuni che hanno aderito singolarmente al progetto Lumière compilando la scheda di adesione.

c.3 Progetto Lumiere: sviluppo del progetto Osservatorio e del tool di monitoraggio degli impianti riqualificati

Lumière è un progetto di ricerca e sviluppo coordinato da ENEA per promuovere l'efficienza energetica e gestionale nel settore della Pubblica illuminazione; dedicato ed indirizzato principalmente ai Comuni italiani, nelle persone dei loro sindaci e pubblici amministratori, il progetto ha coinvolto tutti gli operatori che direttamente ed indirettamente interagiscono ed influiscono nei processi di gestione degli impianti e amministrazione del servizio di luce pubblica, pervenendo alla creazione del Network Lumiere quale braccio operativo e mente pensante del Progetto, e all'Osservatorio Lumiere quale proposta di struttura di supporto ufficialmente riconosciuta per le Pubbliche Amministrazioni ed Istituzioni.

L'obiettivo generale al quale punta il progetto è lo sviluppo di un modello di management degli impianti e del servizio di pubblica illuminazione, al fine di poter assicurare una gestione del servizio efficiente, in termini di sostenibilità ambientale ed energetica ed efficace, in termini di conformità alle esigenze degli utenti finali e del contesto territoriale di riferimento; in poche parole offrire ai cittadini ed alla città un illuminazione sicura, coscienziosamente energivora, sostenibile, innovativa ed in grado di valorizzare il nostro patrimonio urbanistico, architettonico, monumentale e paesaggistico.

Ad oggi Lumiere ha assunto un ruolo di catalizzatore delle problematiche e buone pratiche che emergono dal settore al fine di mettere a sistema conoscenze e competenze e quindi trasformare gli input acquisiti in output di riferimento per la gestione e valorizzazione tanto dell'impianto di Pubblica Illuminazione Nazionale quanto delle eccellenze tecnologiche e professionali presenti sul territorio.

Le attività sviluppate nel corso dell'annualità [rapporti RdS/PAR2013/068, RdS/PAR2013/069 e RdS/PAR2013/070] hanno portato al compimento delle seguenti azioni:

- avviamento dell'Osservatorio Lumière per cambiare l'immagine del progetto e del Paese;
- realizzazione di un tool per il calcolo real time di indicatori di prestazione di impianti illuminotecnici, a cura di CRIET;
- integrazione del tool City Profiler IP, a cura di CRIET;
- consolidamento degli standard sviluppati e sperimentazione del percorso Lumiere in un Progetto Pilota nel quale verrà testato anche il Tool sviluppato nell'annualità precedente e aggiornato in questa;
- definizione di Macro-categorie e parametri per l'audit energetico Lumière; tale attività è stata svolta, in collaborazione con Consip Spa, da Assistal e ha prodotto le Schede Censimento per il MEPA
- supporto verso le amministrazioni all'uso degli standard e tool Lumiere nella realizzazione degli interventi riqualificativi e nell'ammodernamento Smart degli impianti attraverso workshop formativi ed audit degli impianti
- partecipazione al Patto dei Sindaci ed all'Osservatorio Anci Smart City per la diffusione del percorso Lumiere all'interno delle best practice e delle iniziative di queste due reti.

L'attività progettuale ed il conseguimento degli obiettivi generali e/o specifici si è svolta grazie alla collaborazione della maggior parte degli stakeholder che direttamente e/o indirettamente interagiscono nei processi di gestione degli impianti e del servizio di Pubblica Illuminazione. I lavori sono stati coordinati e gestiti dal Network Lumiere in qualità di rappresentante degli interessi del settore e dei cittadini e nella sua funzione di mente pesante e braccio operativo del Progetto.

Tra i principali partner e collaboratori: Aidi, Assil, Assistal, Criet, Università bicocca di Milano, Cielo Buio, Light is, Uncem, Presidenza del Consiglio, UNI, IMQ, UL, Fondazione Cariplo oltre a molti professionisti privati.

Lo svolgimento dell'attività progettuale ed il conseguimento degli obiettivi hanno comportato:



Riunioni singole con gli stakeholder (Aidi, Assil, CRIET, Assistal, Consip , Apil)	136
Riunioni del Network	6
Riunioni con soggetti vari (interviste , comuni, professionisti, ecc)	90
Missioni, spostamenti	165
Contatti telefonici (Comuni, Tecnici – Stakeholder – altri)	1550

Tale rendicontazione deriva da un controllo e annotazione settimanale delle attività svolte ai fini di quantificare il carico di lavoro in funzione del personale ENEA, delle disponibilità temporali e ed economiche del progetto e delle disponibilità in termini di personale e collaborazione da parte degli stakeholder.

I risultati della presente annualità mostrano il conseguimento di una molteplicità di obiettivi, tra i quali una maggiore lucidità sul problema di conciliare la riduzione dei costi energetico/economici degli impianti con la tutela degli interessi e diritti dei cittadini di usufruire di un servizio di qualità oltre che conforme e calibrato ai contesti territoriali.

L'illuminazione pubblica peraltro è ormai entrata a far parte degli obiettivi preferiti della Spending Review del Governo, il cui scopo è quello di risanare il bilancio dello Stato e ridurne i costi economico/energetici della sua gestione.

Una descrizione dei risultati ottenuti nelle attività svolte da ENEA è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/068.

d. Tecnologie per l'industria del freddo

d.1 Caratterizzazione mediante naso elettronico commerciale, dell'atmosfera interna della cella frigorifera caricata con ortofrutta fresca al fine dello sviluppo di un naso elettronico innovativo finalizzato al risparmio energetico

Lo scopo di questa attività di ricerca triennale è lo sviluppo di un sistema di monitoraggio automatico e regolazione delle condizioni di esercizio degli impianti frigoriferi per lo stoccaggio ed il trasporto refrigerato dell'ortofrutta al fine di ottimizzare il consumo energetico e migliorare la qualità organolettica dell'ortofrutta.

Il lavoro di ricerca svolto nella seconda annualità dell'AdP è stato sviluppato alla luce dei risultati ottenuti nel primo anno quindi:

- sono state eseguite campagne sperimentali su vari tipi di ortofrutta (albicocche, uva, clementine, mandarino biologico tardivo di Ciaculli, fragole biologiche del Metaponto, banane) monitorati mediante naso elettronico commerciale (PEN3 della Airsense) anche nelle condizioni tipiche di stoccaggio e trasporto refrigerato, utilizzando quindi il laboratorio allestito nel primo anno, col principale obiettivo di ricavarne informazioni utili a sviluppare il nostro dispositivo a basso costo;
- l'analisi critica dei risultati ottenuti con il naso elettronico commerciale nelle varie campagne sperimentali insieme ai primi risultati delle varie versioni del dispositivo, realizzato a partire dallo scorso anno utilizzando la "open platform" della Libelium ha consentito di svilupparne i vari elementi (numero e tipologia dei sensori utilizzati, configurazione e condizionamento dei sensori, sistema di campionamento dell'atmosfera della cella frigo carica di ortofrutta, tipologia di analisi dei dati) compatibilmente con le caratteristiche della "open platform" e i limiti imposti dal campo applicativo;
- realizzazione e caratterizzazioni preliminari di più nodi sensoriali che possano funzionare alimentati solo da batterie al litio trasmettendo i dati dei sensori su di essi montati in modalità wireless.

Le campagne sperimentali effettuate monitorando con il naso elettronico commerciale le emissioni dell'ortofrutta refrigerata hanno confermato le potenzialità di un simile dispositivo, quasi sempre in grado di seguire l'evoluzione temporale delle emissioni anche dell'ortofrutta refrigerata, evidenziando però la criticità del sistema di campionamento utilizzato. Il PEN3 utilizza comunque sensori a ossidi metallici commerciali ma è lo sviluppo del sistema di campionamento che fondamentalmente ne determina il costo, dell'ordine dei 40 k€, almeno un ordine di grandezza superiore ai limiti che abbiamo imposto al dispositivo in sviluppo. Un altro aspetto critico delle buone prestazioni del PEN3 non direttamente replicabile nel nostro dispositivo è nelle caratteristiche della camera di campionamento di dimensioni ridottissime con i 10 sensori opportunamente situati nella stessa in modo da vedere tutti assieme la stessa atmosfera lavorando ognuno alla sua temperatura di funzionamento ottimale. Inoltre un sistema di pompe, elettrovalvole e filtri consente di aspirare a flusso controllato l'aria da campionare nella camera di misura fino a che i sensori non raggiungano il valore di resistenza all'equilibrio e poi flussare nella stessa aria "pulita" di riferimento che consente di riportare il valore della resistenza del singolo sensore ad un valore di riferimento. Per quanto detto è operazione complessa cercare anche solo di stabilire il numero minimo, la tipologia e le condizioni di funzionamento dei sensori più significativi del PEN3 da utilizzare sul dispositivo in studio. Si è comunque cercata una metodologia di determinazione dei sensori significativi in modo da ritenere la maggior informazione utile con un numero di sensori ridotto rispetto al naso commerciale utilizzato. Accoppiando questa informazione su ogni tipo di frutto con quella degli altri frutti si è determinata una "classifica" dei sensori significativi per il cluster di frutti presi in esame. Questo permetterebbe di progettare nasi elettronici dedicati al monitoraggio del singolo frutto, o per gruppi di frutti. Determinati i sensori significativi del naso commerciale, di cui non è dato conoscere le specifiche, si sono correlati questi sensori con i sensori (E2V, Figaro) commerciali, facilmente reperibili sul mercato, ottenendo un gruppo di sensori utilizzabili in nasi elettronici progettati ad hoc allo scopo di monitorare un frutto in particolare o un gruppo di frutti.

La realizzazione di un naso elettronico con un numero ridotto di sensori adatti al rilevamento dell'andamento della frutta, dovrebbe basarsi sulla classifica dei sensori maggiormente significativi ottenuta in precedenza e riassunta in Tabella 100.

Tabella 100. Sensori maggiormente significativi nelle analisi effettuate con il PEN3

Frutto	Sensori più significativi
Albicocche	6 8 3 1 9
Ciliege	1 3 6 8 9
Uva	9 7 6 8 1
Arance	3 6 9 8 2
Pesche	2 6 8 3 9
Clementine "Mandarino tardivo di Ciaculli"	2 9 7 6 3
Clementine di origine spagnola	1 9 2 3 7
Fragole	2 6 8 1 3
Banane	2 3 1 6 9

Number in array	Sensor name	General description	Reference
1	W1C	Aromatic compounds	Toluene, 10 mg/kg
2	W5S	Very sensitive, broad range sensitivity, react on nitrogene oxides, very sensitive with negative signal	NO_2, 1 mg/kg
3	W3C	Ammonia, used as sensor for aromatic compounds	Benzene 10 mg/kg
4	W6S	Mainly hydrogen, selectively, (breath gases)	H_2, 0.1 mg/kg
5	W5C	Alkanes, aromatic compounds, less polar compounds	Propane 1 mg/kg
6	W1S	Sensitive to methane (environment) ca. 10 mg/kg. Broad range, similar to No. 8	CH_3, 100 mg/kg
7	W1W	Reacts on sulfur compounds, H_2S 0.1 mg/kg. Otherwise sensitive to many terpenes and sulfur organic compounds, which are important for smell, limonene, pyrazine	H_2S, 1 mg/kg
8	W2S	Detects alcohol's, partially aromatic compounds, broad range	CO, 100 mg/kg
9	W2W	Aromatics compounds, sulfur organic compounds	H_2S, 1 mg/kg
10	W3S	Reacts on high concentrations > 100 mg/kg, sometime very selective (methane)	CH_3, 10 CH_3, 100 mg/kg

Quantitativamente si è osservato che utilizzando i 5 sensori maggiormente significativi, si riesce ad avere un contenuto informativo intorno all'80% mentre con 4 ci aggiriamo intorno al 70%. A partire dall'attività dell'anno passato è stato valutato il comportamento di vari sensori commerciali compatibili con la "open platform" Libelium utilizzata per monitorare lo stato di alcuni tipi di frutta, come riassunto in Tabella 101.

Tabella 101. Sensori utilizzati nella "open platform" Libelium

Sensore commerciale	Caratteristiche principali
TGS 2600 (Figaro)	AP1: etanolo, isobutano (++) monossido di carbonio, metano(+) idrogeno(-)
TGS 2602 (Figaro)	AP2: toluene, idrogeno solforato, etanolo, ammoniaca(++)
TGS 2620 (Figaro)	SV: etanolo, monossido di carbonio, metano, iso-butano,idrogeno (+)
Mics 5521 (E2V)	composti volatili organici(VOC ++), monossido di carbonio (+)
TGS 4161 (Figaro)	anidride carbonica (++) monossido di carbonio (-)
TGS 42442 (Figaro)	monossido di carbonio (++)
SK-25F (Figaro)	ossigeno(+++) virtualmente selettivo

Dalla tabella ed utilizzando le informazioni delle specifiche dei sensori commerciali predetti della Figaro ed E2v, oltre che le sperimentazioni con le schede di acquisizione Libelium, è stata costruita la Tabella 102 di confronto tra sensori del naso elettronico PEN3 e sensori commerciali da montare sul dispositivo in sviluppo.

Tabella 102. Sensori maggiormente significativi e corrispondenza con i sensori commerciali utilizzati

N sensore PEN3	Nome sensore PEN3	Reference	Caratteristiche sensibilità	Sensori commerciali sperimentati
2	W5S	NO_2	Largo spettro, sensibile a ossidi di azoto	e2v Mics 5521
1	W1C	Toluene	composti aromatici	Figaro TGS 2602
3	W3C	Benzene	Composti aromatici, ammoniaca	Figaro TGS 2602
6	W1S	CH_4	Largo spettro, sensibile al metano	Figaro TGS 2600
9	W2W	H_2S	Composti organici, composto aromatici solforosi	Figaro TGS 2602
8	W2S	CO	Largo spettro, alcool	Figaro TGS 4161 Figaro TGS 4242
7	W1W	H_2S	Composti solforosi	Figaro TGS 2602
Senza corrispondenza			O_2	Figaro SK25

Il confronto tra le caratteristiche dei sensori del PEN3 con quelli compatibili con la "open platform" suggerisce la possibilità di replicare i 7 sensori del PEN3, che portano un contenuto informativo intorno al 90%, utilizzando 5 sensori. Con l'aggiunta del sensore Figaro SK25, e quindi con 6 sensori commerciali si riesce ad ottenere un naso elettronico mirato al monitoraggio della frutta con alta capacità di monitoraggio.

L'analisi critica dei dati forniti dal PEN3 su tutte le campagne sperimentali condotte sulla frutta ha evidenziato notevoli difficoltà nell'approccio mirante a realizzare un naso elettronico dedicato solo riducendo il numero di sensori a ossidi metallici già presenti nel PEN3. In effetti, le caratteristiche più interessanti delle "open platform" sono basate sul basso consumo energetico di tutta la piattaforma, in particolare, la scheda madre (73,5 x 51 x 13 mm^3) ha una architettura hardware progettata con interruttori digitali che consentono di accendere e spegnere a piacimento sia le interfacce dei sensori che il modulo radio di trasmissione dei dati, rendendo possibile la realizzazione di un nodo sensoriale anche complessivamente a basso consumo che può funzionare col solo ausilio di una batteria per periodi significativamente lunghi.

Le dimensioni del nodo sensoriale, completamente autonomo, sono molto contenute (nodo completo di batteria: 73,5 x 51 x 60 mm^3) aprendo la possibilità di realizzare anche più nodi sensoriali da utilizzare o comunque caratterizzare in ambienti ristretti. I nodi sensoriali sono stati realizzati a partire dalla "open platform" Waspmote Libelium con la scheda sensori Sensor Gases 2.0 equipaggiata con i sensori riportati in Tabella 103.

Tabella 103. Dettaglio sensori nei nodi sensoriali utilizzati

Sigla	Misura	Range	Sensitivity	Accuracy	Response time	Average consumption
808H5V5	R.H.%	0-100% R.H.		<6%	<15 s	0,38 mA
MCP9700A	temperatura	-40 °C,125°C	10 mV/°C	2°C	1,6s	6 µA
TGS4161	CO_2	350-10000 ppm	44-72 mV nel range		1,5 min	50 mA
SK-25	O_2	0-30%			15 s	0 µA
TGS2600	AP1	1-100 ppm	0,3-0,6 R(10 ppmH_2)/(Rair)			
TGS2602	AP2	1-30 ppm	0,15-0,5 R(300 ppm)/(R50ppm)		3 s	6,1 mA
TGS2620	SV	50-5000 ppm	0.3-0.5 R(10,ppmEtanolo)/(Rair)		3 s	46 mA

I nodi sensoriali sono poi stati configurati mediante lo sviluppo di un firmware che definisce la configurazione di ogni singolo sensore, in particolare i tempi di accensione, per i sensori che lavorano in temperatura, la loro lettura e le modalità di trasmissione dei dati sono le caratteristiche che influenzano poi alla fine il consumo energetico (e quindi la durata per carica della batteria) del singolo nodo sensoriale. Il sistema è stato quindi fatto funzionare in modalità semicontinua, cioè all'avvio del nodo, sequenzialmente, si accendono i vari sensori (ad esclusione del sensore di O^2, umidità e temperatura), si attendono circa 35 s per il preriscaldamento e si effettua la misurazione del valore di tensione in uscita; in particolare, in base alla tipologia di sensore, questa viene letta direttamente ai capi degli stessi per l'O_2 (SK25) ed il CO_2 (TGS4161), mentre per l'AP1 (TGS2600), AP2 (TGS2602) e SV (TGS2620) viene letta ai capi di una resistenza di carico che fa da partitore.

In cascata entrambe le configurazioni presentano uno stadio amplificatore a guadagno variabile. La regolazione della resistenza di carico è importante per stabilire il range di funzionamento del sensore direttamente dipendente dalle concentrazioni dei composti da misurare; essa comunque va scelta in un intervallo di valori possibili tali da rispettare una soglia minima di consumo di potenza sul sensore per evitarne la rottura. Durante tutti i test effettuati, i circuiti di condizionamento dei sensori sono stati impostati partendo dal valore più basso indicato nei rispettivi datasheet del costruttore, ovvero la resistenza di carico uguale a quella iniziale del sensore in aria libera in modo da ottenere una tensione letta intorno alla metà del range d'ingresso del convertitore A/D (0-3,3 V, quindi solitamente circa 1,6 V). Questa scelta, considerata l'indeterminatezza del campo applicativo (variabilità di frutta, stato di maturazione, quantità, etc.) e seppur limitando di molto la dinamica operativa dei sensori, ci ha comunque permesso di ottenere dei buoni risultati.

Successivamente si è deciso quindi di implementare un algoritmo che permettesse di effettuare un "autorange" adeguando automaticamente il valore della resistenza di carico e del guadagno dello stadio amplificatore, ottenendo così un sistema auto adattivo rispetto al contesto di esercizio. Inoltre, i valori di uscita non verranno più espressi in tensione ma bensì direttamente come valore di resistenza del sensore; questo ci permetterà di avere una scala continua di valori anche cambiando resistenza di carico e/o guadagno.

Il firmware dovrà quindi anche effettuare ciclicamente letture di tensione dai vari sensori, verificare che ci si trova intorno alla metà del range d'ingresso del convertitore A/D ed eventualmente effettuare un aggiustamento della resistenza di carico entro i limiti imposti dal costruttore e/o del guadagno, poi calcola la resistenza del sensore come dato d'uscita. In questo modo sarà possibile ottimizzare la dinamica operativa dei sensori e quindi seguire le dinamiche ambientali.

I tre nodi sensoriali così realizzati sono stati sottoposti ad una campagna sperimentale per una valutazione preliminare della configurazione scelta in base alla loro risposta ai composti organici volatili e ai principali gas emessi da pesche conservate a temperatura ambiente. Tali test sono stati supportati da analisi gas cromatografica in spettrometria di massa (GC/MS)previa microestrazione in fase solida con fibra di silice fusa ricoperta da un sottile strato di materiale assorbente (75 µm) Carboxen/polidimetilsilossano.

I parametri relativi al trattamento del campione, tempi di esposizione della fibra (15 minuti), temperatura (300 °C) volume di estrazione e i parametri analitici sono stati opportunamente calibrati e raffrontati con quanto disponibile dalla letteratura.



Figura 379. Configurazione sperimentale per una valutazione preliminare della risposta dei nodi sensoriali all'emissione di VOC

Per il monitoraggio dei composti organici volatili emessi dalle pesche è stato messo a punto un apparato sperimentale come mostrato in Figura 379 in cui sono state impiegate buste di Tedlar da circa 20 L in cui in una sono state inserite due pesche insieme ai nodi sensoriali identificati come 1 e 3, ed in un'altra solo il nodo sensoriale 2 usata come controllo positivo.

Dopo l'estrazione, la fibra è trasferita con l'ausilio di un fiber holder per campionamento manuale, allo strumento analitico per la separazione, l'individuazione e la quantificazione degli analiti. In una prima serie di test i nodi sensoriali erano configurati per acquisire dati ogni 3 h, ma la presenza di composti organici volatili, rilevata dai sensori AP1, AP2 e SV del nodo 2 e poi confermata dalle analisi cromatografiche, ha evidenziato la presenza di una frazione organica emessa dalla busta di tedlar e/o dal nodo stesso.

Le analisi chimiche mediante GC/MS hanno evidenziato la presenza di fenolo e N,N-dimetilacetammide (di cui poi è stata verificata la presenza anche se in piccole quantità nelle buste di Tedlar anche prima del test) e il dimetilcarbonato e il dietilcarbonato, componenti presenti invece nelle batterie a litio dei 3 nodi sensoriali (come confermato dai dati di letteratura) ed emessi dunque dalle stesse durante il funzionamento. Mentre i primi due contaminanti sono stati facilmente eliminati con opportune prepulizie delle buste di campionamento, il problema dell'emissione di dimetilcarbonato e di dietilcarbonato, composti emessi dai nodi sensoriali a cui gli stessi sono molto sensibili, non è facilmente eliminabile almeno con questa configurazione dell'apparato sperimentale, ma nello sviluppo dei nodi sensoriali bisognerà prevedere un spazio di campionamento per i sensori in cui non sia presente almeno la batteria, meglio tener fuori anche le schede del Waspmote ed affacciare allo spazio di campionamento i soli elementi sensibili. Una seconda serie di test, effettuata abbreviando i tempi di acquisizione (ogni 3 minuti, anche per ridurre il disturbo dell'emissione dei nodi) e dimezzando il valore della resistenza di carico, ha evidenziato una perdita di sensibilità dei nodi che non riuscivano più ad evidenziare i composti volatili organici sempre presenti in abbondanza, come verificato da analisi al GC/MS. Nella terza serie di test si è mantenuta l'acquisizione ogni 3 minuti riportando però la resistenza di carico al valore precedente, i nodi sensoriali in questo caso seguivano sufficientemente le indicazioni delle analisi al GC/MS, in particolare il sensore AP2, oltre ad essere più sensibile di AP1 e SV che si comportano in modo simile nei test effettuati, ha evidenziato anche una minore sensibilità all'umidità, l'interferente più abbondante che ci si aspetta nelle reali condizioni di funzionamento.

In generale i test effettuati con l'ausilio di analisi al GC/MS hanno evidenziato per i nodi sensoriali la necessità di calibrare i singoli sensori in condizioni note di esposizione a composti volatili organici e ai gas più importanti. Sono state quindi effettuate calibrazioni preliminari dei singoli sensori utilizzando un apparato sperimentale che permette di esporre contemporaneamente i nodi allo stesso flusso di analita a concentrazione controllata. I gas usati per la calibrazione sono stati anidride carbonica (range in ppm: 350-3500) ed ossigeno (range in %: 1-20). I nodi sensoriali sono stati, infatti, realizzati montando anche i sensori SK-25, notevolmente selettivo per la rivelazione di ossigeno, e TGS4161, selettivo per l'anidride carbonica, con l'obiettivo di seguire la respirazione dell'ortofrutta, il parametro più direttamente collegato alla shelf-life. Le concentrazioni volute sono ottenute miscelando mediante mass flow controller i gas di bombole certificate a concentrazioni di CO_2/N_2, aria, N_2. Per valutare invece il funzionamento anche dei sensori rimanenti, AP1, AP2 ed SV sono state effettuate calibrazioni

preliminari con vapori a concentrazioni note di ammoniaca (range in ppm: 0-200), limonene (range in ppb: 0-200), etanolo e metanolo. I vapori a concentrazioni note in aria secca sono stati ottenuti a partire da opportuni tubi a permeazione che rilasciano quantità certificate del vapore sempre che siano mantenuti a temperatura fissa con un'accuratezza di 0,1 °C.

E' stato infine sviluppato, in ambiente Labview, un nuovo software per l'acquisizione, visualizzazione e gestione dei dati dei nodi sensoriali. Infatti la grande quantità di dati da gestire durante i vari test e le calibrazioni ha reso praticamente molto urgente la necessità di automatizzare la comunicazione tra il pc e molteplici nodi sensoriali in contemporanea, presentare i dati dei singoli sensori in tempo reale e salvare i dati finali in formato Excel. I nodi trasmettano i dati tramite protocollo Zigbee. Un'unità di ricezione centrale, collegata al computer con la porta USB, riceve i dati dalle centraline, il programma acquisisce le stringhe da quest'ultima unità. Ad ogni stringa il programma memorizza tutte le informazioni sia sulla memoria RAM che sul disco rigido per evitare la perdita dei dati per spegnimento o blocco non previsto del computer.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/072.

d.2 Ottimizzazione e caratterizzazione di pannelli sandwich contenenti Materiali a Cambiamento di Fase per la realizzazione di celle frigorifere per il trasporto ferroviario

L'attività sperimentale ENEA è stata finalizzata alla caratterizzazione su tavola vibrante e ultrasonora di prototipi di pannelli a sandwich contenenti materiali a cambiamento di fase (PCM), opportunamente contenuto, per la realizzazione di celle frigorifere specificatamente concepite per il trasporto ferroviario.

Particolarmente importante è stata la progettazione e messa a punto, insieme all'Università Politecnica delle Marche, del sistema di packaging necessario al contenimento del PCM e di implementazione dei PCM con gli strati isolanti dei pannelli. E' stato studiato un sistema di impacchettamento del PCM la cui tecnologia è derivata dal packaging dei prodotti alimentari. Il primo prototipo prodotto è stato realizzato in polietilene (PET) stampato con la tecnica del vuoto in aspirazione: a partire da un foglio di polimero riscaldato, sotto l'azione di forze di richiamo per depressione, si genera un pannello con un reticolo a maglia quadrata di 256 tasche parallelepipedi aventi dimensioni 3 cm x 3 cm x 1,5 cm . Tale pannello[23] dopo il riempimento delle tasche con il PCM deve essere sigillato con un foglio di PVC saldato a pressione e ad una certa temperatura compatibile con i materiali.

La prima sperimentazione su questo prototipo ha evidenziato difetti costruttivi sia di tipo dimensionale che di tenuta e quindi si è passati alla evoluzione che ha portato ad un secondo prototipo caratterizzato da un reticolo a maglia quadrata di 81 tasche parallelepipedi aventi dimensioni 5 cm x 5 cm x 3 cm di profondità. Considerando le esigenze sperimentali, sono stati prodotti, in stretta collaborazione con la ditta SA.ME, più di 30 contenitori aventi dimensioni 51 cm x 51 cm. Per il riempimento di tutti i contenitori è stata utilizzata dall'università una massa di PCM di 160 kg acquistata dalla Rubitherm Gmbh di Berlino (Tabella 104).

Tabella 104. Caratteritiche Rubitherm RT 35

Intervallo di fusione	29-36 °C
Intervallo di solidificazione	36-31° C
Capacità di accumulo termico	170 /kg

La paraffina, successivamente portata totalmente a fusione all'interno di forno elettrico è stata utilizzata per il riempimento delle tasche di ciascun contenitore: in assenza di temperature ambiente superiori al punto di fusione, la paraffina è passata allo stato solido. A questo punto è stata effettuata la sigillatura termica a pressione dei contenitori applicando la pellicola sulla superficie alla pressione di 3 bar ed una temperatura di 170 °C, secondo quanto prescritto dal fornitore, che ha portato al prodotto finale.

A seguito delle analisi di comportamento termico dei vari modelli funzionali di parete innovativa testati e alla successiva progettazione da parte dell'Università Politecnica delle Marche della stratificazione scelta, si è proceduto alla realizzazione dei prototipi di parete delle celle frigorifero usati successivamente sia per le prove indoor di comportamento termico sia per quelli di reazione alle sollecitazioni meccaniche. I moduli di pannello sono stati prodotti utilizzando: lamierino di acciaio plastificato dello spessore di 8/10 mm, schiuma poliuretanica, strato di paraffina incapsulata nel sistema di packaging realizzato con UNIVPM ed infine il telaio laterale in tavola di legno.

[23] Realizzato grazie anche alla collaborazione gratuita della SA.ME di Perugia

La schiuma poliuretanica (Tabella 105) è stata scelta per le caratteristiche di espansione successive alla operazione di iniezione nell'intercapedine formatasi tra lo strato di PCM ed il lamierino di chiusura interno.

Tabella 105. Caratteristiche della schiuma poliuretanica

Tipo schiuma *Foam type*		PUR 963	PUR 962 (1)	PUR 961	PUR 960
Colore *Colour*		giallo *yellow*			
Classe di infiammabilità *Flammability class*	DIN 4102	B2	B3		
Rendimento (espansione libera) *Volume (free foamed)*		~40 L	~40 L (-10°C ~25L)	~40 L	~40 L
Densità *Density*		20÷25 kg/m³	16÷18 kg/m³	16÷18 kg/m³	20÷25 kg/m³
Allungamento alla rottura *Elongation at break*	DIN 53455	20÷25%	20÷30%	20÷30%	20÷25%
Conduttività termica *Thermal conductivity*	20°C DIN 52612	0,039 W / mK	0,036 W / mK	0,036 W / mK	0,039 W / mK
Tempo di taglio *Cutting time*	Ø3cm	2			25'÷ 30' _ 18°C - 60% R.H.
Temperatura di posa (1) *Application temperature* (1)		5°÷ 20° C (supporto / *surface*) (1) +20°C (bombola / *can*) (1)			
Tempo di reticolazione *Tack free time*		5'÷ 10' _ 18°C - 60% R.H.			
Tempo di indurimento *Hardening time* (5°÷ 20° C)		1,5 ÷ 5 h	1,5 ÷ 5 h (-10°C ~10 h)	1,5 ÷ 5 h	1,5 ÷ 5 h
		(in funzione a temperatura ed umidità / *depending on temperature and humidity*)			
Temperatura di esercizio *Temperature resistance*		-40°C ÷ +90°C			
Stabilità dimensionale *Dimensional stability*		max -1%			
Assorbimento d'acqua *Water absorbtion*	DIN 53428	max 1% vol.			
Resistenza compressione *Compression strength*	DIN 53421	0,04 ÷ 0,05 MPa			
Resistenza Trazione *Tensile strength*	DIN 53455	0,07 ÷ 0,08 MPa			

(1) Temperatura di posa min. per PUR 962 WINTER è –10°C (supporto/bombola), si consiglia tuttavia una temperatura della bombola 5÷20°C
Min application temperature for PUR 962 WINTER is –10°C (surface / can), however it is recommended to have a can temperature of 5÷20°C.

Le fasi di realizzazione del pannello sono state la chiusura del telaio con uno dei lamierini e il successivo fissaggio del modulo-contenitore del PCM sulla superficie interna del lamierino stesso (Figura 380).



Figura 380. Fasi di lavorazione della struttura di contenimento del PCM

Successivamente è stato applicato il secondo lamierino di tamponamento ed iniettata la schiuma poliuretanica all'interno del vano del pannello, inserendo l'apposito cannello nei fori praticati sulla superficie laterale del telaio (Figura 381).



Figura 381. Fasi di lavorazione del pannello

Al termine delle lavorazioni descritte, i lamierini di chiusura sono stati fissati sul telaio con apposite viti. Con analoghe operazioni, ma tralasciando lo strato di PCM, è stato realizzato il pannello base destinato al confronto. Ovviamente, dovendo rispettare per entrambi la stratificazione, la resistenza termica dell'isolante e quindi, a

parità di materiale coibente, il suo spessore, il pannello di riferimento risulta di spessore inferiore, come è possibile osservare dalla Figura 382.

I prototipi dei due pannelli multistrato, con e senza PCM sono stati quindi verificati sperimentalmente su tavola vibrante per una prima verifica delle caratteristiche meccaniche che valutasse l'influenza della presenza del PCM opportunamente contenuto nel packaging realizzato.



Figura 382. Confronto tra pannello prototipo e pannello di riferimento

I test sono stati eseguiti, presso i laboratori ENEA su tavola vibrante di dimensioni 2 m x 2 m. Le prove dinamiche su entrambi i pannelli, sono state precedute e seguite da prove non distruttive di tipo ultrasonico volte ad evidenziare le eventuali disomogeneità nei 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 a 1000 miglia.

Le prove sono state gestite mediante il sistema hardware LMS SCADAS III a 16 canali che include un convertitore A/D a 24 bit, controllato dal software LMS Test Lab. I dati sperimentali sono stati acquisiti mediante accelerometri tradizionali triassiali PCB (modello 356A15) e tramite il sistema 3DVision, di tipo Motion Capture 3D, un sistema opto-elettronico, basato su tecnologia VICON MX, in grado di registrare il moto di marcatori in uno spazio tridimensionale tramite la triangolazione dei dati acquisizioni da una "costellazione" di telecamere. Il funzionamento è assimilabile a un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere MX, una volta fissate alle pareti o montati su appositi tripodi, illuminano il proprio campo di vista per mezzo di una serie di led che emettono con lunghezze d'onda predominanti nel vicino infrarosso (NIR) ed acquisiscono la radiazione retro-riflessa dai marcatori posizionati nei punti di cui si vuole stabilire il moto. Il dato grezzo che fornisce il sistema è costituito dalla traiettoria nello spazio di tali punti in un sistema di riferimento prefissato tramite la procedura di calibrazione del sistema. Trattandosi di un sistema di visione 3D, la risoluzione geometrica raggiungibile dipende, come è noto, dalla configurazione spaziale adottata (in particolare, dalla posizione delle telecamere rispetto ai marcatori) e dalla qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno strumento apposito che viene adeguatamente movimentato all'interno del volume di misura. Il sistema è dotato di 9 telecamere digitali MX nell'infrarosso per le acquisizioni 3D e 4 videocamere DV per i filmati sovrapponibili in sincrono con i marker.

L'utilizzo di questo sistema, consentendo l'acquisizione diretta delle traiettorie dei marcatori posti sui pannelli durante le prove dinamiche, ha lo scopo di evidenziare mediante la misura degli spostamenti tra i marcatori stessi, rilevati ad esempio lungo lo spessore del pannello, eventuali criticità dovute a scollamenti e/o rigonfiamenti causate da possibili disomogeneità strutturali provocate dal processo di invecchiamento simulato.

Per le campagne sperimentali su tavola vibrante è stato utilizzato lo stesso file di input applicato nella precedente campagna sperimentale, indicato dalla norma MIL-STD-810D per il trasporto delle Military Handbook applicato in direzione longitudinale mediante il sistema LMS test Lab con una scansione da 5 a 200 Hz graficando la densità spettrale [g^2/Hz] in funzione delle frequenze [Hz].

Entrambi i pannelli sono stati sottoposti a prove ultrasoniche prima e dopo i test vibrazionali volte ad evidenziare eventuali disomogeneità dovute alle prove su tavola. Le prove eseguite sul pannello con il PCM hanno mostrato una discreta omogeneità. Sono stati pertanto individuati 20 punti di misura su ogni pannello disposti su una griglia di 4 x 5 aree di 10 x 10 cm.

Il confronto dei risultati delle prove non distruttive ottenuti sul pannello tal quale (T.Q.) con quello contenente PCM prima e dopo i test su tavola vibrante è riportato in Tabella 106.

Tabella 106. Prove ultrasonore pre/post test su tavola vibrante

	Pannello T. Q. prima	Pannello T. Q. dopo	Pannello con PCM prima	Pannello con PCM dopo
Velocità sonora media m/s	377	337	446	400
Deviazione standard m/s	147	155	113	121

Le prove ultrasoniche eseguite prima e dopo i test su tavola vibrante hanno evidenziato che, laddove il riempimento è omogeneamente distribuito all'interno della struttura a sandwich, non si sono verificate sostanziali attenuazioni nella trasmissione dei segnali imputabili a presenza di vuoti rilevabili da possibili scollamenti/delaminazioni/cambiamenti di fase. I risultati di test eseguiti sono da ritenersi propedeutici alla verifica dell'effetto delle vibrazioni sul comportamento di altri materiali a cambiamento di fase di varia composizione (es. sali idrati).

E' da studiare il comportamento di questi materiali nella configurazione di posizionamento verticale/orizzontale relativa al tetto ed alle pareti laterali della cella frigorifera; a tal fine sono da individuare eventuali 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.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/074.

e. Comunicazione e diffusione dei risultati

Al fine di dare ampia comunicazione dei risultati ottenuti, oltre alla diffusione dei rapporti di ricerca realizzata attraverso il sito istituzionale, dal quale saranno resi scaricabili i deliverable, sono state realizzate numerose iniziative di disseminazione.

Le principali azioni di diffusione e comunicazione sono state le seguenti:

- pubblicazioni ed articoli sulla stampa, generica e specializzata;
- elaborazione dei rapporti tecnici, che riportano informazioni e dettagli di grande importanza, ma destinati a un pubblico ristretto di tecnici e specialisti del settore ed in parallelo la diffusione di testi e strumenti informativi destinati ad un pubblico più vasto e ad esso più accessibili;
- organizzazione di eventi (workshop, seminari, manifestazioni espositive) il più possibile distribuiti sul territorio nazionale, sia per illustrare i risultati nella loro totalità, che per argomenti specifici;
- individuazione dei destinatari principali delle ricerche e, di conseguenza, maggiormente interessati a conoscerne e utilizzarne i risultati, nonché le modalità e gli strumenti per raggiungerli e interessarli.

Un altro continuo canale di diffusione delle attività svolte e dei relativi risultati è stato alimentato attraverso le numerose riunioni con i gestori e gli operatori dei settori interessati dal presente progetto, dall'organizzazione di convegni e seminari didattici rivolti ad associazioni di categoria e/o professionali.

Tra queste inizitive, in particolare di carattere internazionale, si vogliono segnalare i lavori di partecipazione al gruppo di lavoro denominato Annex 54 dell' IEA ("Sistemi ibridi di micro-cogenaratori negli edifici") e le attività in ambito EERA sul tema "Smart grid" e "smart cities", che costituisce un'altra naturale e prestigiosa sede operativa di coordinamento delle attività.

Il materiale, tecnico e a carattere divulgativo, è stato reso disponibile sul sito ENEA e attraverso tutti i canali previsti nel programma, finalizzati a creare interesse e coinvolgimento degli stakeholder.

Una elencazione dettagliata di tali iniziative è riportata nel rapporto RdS/PAR2013/155.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nel capitolo vengono descritte brevemente le attività, e i relativi risultati, svolte dai soggetti che hanno collaborato con ENEA.

a. Reti di poligenerazione

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

Obiettivo dello studio, inserito nell'ambito dell'Obiettivo a "Reti di Poligenerazione" (subtask a.1) , è stato quello di definire un possibile set di indici per la valutazione delle prestazioni energetiche di reti di teleriscaldamento, con particolare focus su reti di piccola taglia. Inoltre, si è cerato di investigare l'adeguatezza di tali indici nel descrivere l'eventuale apporto di energia termica in rete, proveniente da fonti rinnovabili.

A tal fine, sono state analizzate le principali norme e studi presenti nella letteratura scientifica di settore, fra cui in particolare le seguenti:

- Norma UNI EN 15316-4-5:2007 - Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti di impianto. Parte 4-5: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, prestazione e qualità delle reti di riscaldamento urbane e dei sistemi per ampie volumetrie;
- Raccomandazione CTI 14: 2013 - Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edificio;
- P. E. Pacot, S. Reiter, (2011). Quality indicators for district heating networks. Proceedings of the International Conference CISBAT 2011 - Clean Tech for sustainable buildings - From Nano to urban scale[24].

Lo studio della Norma UNI EN 15316-4-5:2007 ha evidenziato che esistono diversi indici applicabili alla valutazione energetica degli impianti di teleriscaldamento, fra cui in particolare i Primary Energy Factors (PEF), che si propongono di mettere in relazione l'energia primaria associata ai flussi energetici legati alla generazione termica, con l'energia termica prodotta dall'impianto stesso e inviata alla rete di teleriscaldamento. Seguendo l'approccio delineato dalla normativa UNI EN 15316-4-5:2007, è possibile valutare le prestazioni di un sistema di teleriscaldamento facendo riferimento allo schema in Figura 383 che rappresenta i flussi di energia prodotta dall'impianto.

Il PEF è definito come:

$$\mathrm{PEF} = \frac{\text{Total primary energy for thermal production}}{\text{Delivered energy}}$$

Informazioni dettagliate sugli indici prestazionali utilizzati per la caratterizzazione delle reti termiche sono contenute nel rapporto RdS/PAR2013/056.

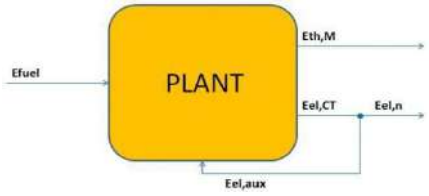


Figura 383. Flussi energetici entranti/ uscenti dall'impianto

Tali indici consentono di tenere in conto anche l'eventuale apporto di energia termica da fonte rinnovabile, nello studio condotto dal Politecnico sono stati esaminati diversi scenari di generazione termica che, a parità di apporto termico alle utenze finali, prevedessero rispettivamente integrazione termica da solare termico, caldaie a biomassa, calore di scarto da processo industriale, calore proveniente da impianto di cogenerazione. Il calcolo parametrico di tali indici per diverse configurazioni di impianto porta ai risultati illustrati in Tabella 107. Per ciascun caso è stato calcolato anche il rendimento globale del sistema η_G.

Lo studio ha portato a trarre le seguenti conclusioni:

- la cogenerazione rappresenta la tecnologia che ottiene i valori migliori dell'indice PEF, pertanto risulta sempre preferibile, rispetto ad altre soluzioni tecnologiche, dal punto di vista di tale indicatore;
- l'adduzione di energia termica in rete da impianti solari è sempre vantaggiosa, in quanto, ovviamente, l'utilizzo di energia solare permette un minor utilizzo di energia primaria fossile, a parità di domanda da soddisfare;
- se ad un impianto di cogenerazione si abbina un impianto solare termico, l'indice PEF peggiora. Tale risultato è spiegabile considerando che l'apporto da rinnovabile implica un minor impiego del cogeneratore, a parità di domanda termica. Conseguentemente, si ha anche una diminuzione della produzione elettrica, alla quale la norma conferisce un valore energetico molto alto nel calcolo del PEF;
- l'utilizzo di una caldaia a gas naturale risulta energeticamente equivalente a quello di una caldaia a biomassa. L'utilizzo della biomassa, convenzionalmente considerata fonte rinnovabile di energia, implica lo stesso dispendio di energia primaria che si ha per il gas naturale (i fattori di conversione in energia primaria sono uguali);
- nonostante l'impiego di calore di scarto da processi industriali sia indubbiamente una buona pratica per l'efficienza energetica delle reti di teleriscaldamento, tale caso non è previsto all'interno delle normative in corso di validità consultate. E' stato trovato un riferimento a tale possibilità unicamente all'interno della bozza di normativa TC 228 WI 00228 027:2004, redatta dal Comitato Tecnico 228 del CEN, attualmente ritirata. Ipotizzando di applicare l'indice PEF con i valori di fattori di conversione dell'energia primaria previsti dalla TC 228, si ha che l'impiego di calore di scarto industriale, in combinazione con altre tecnologie tradizionali per la produzione di calore, risulta energeticamente sempre vantaggioso

Nel complesso, si può ritenere che gli indici Primary Energy Factors siano per lo più validi al fine di poter effettuare analisi qualitativamente comparative delle prestazioni energetiche di impianti differenti, poiché non sono formulati con l'approccio del rendimento energetico di un sistema di produzione, ma tendono a comparare

[24] Rif. http://hdl.handle.net/2268/96467

l'impiego globale di energia primaria, a parità di effetto utile, per le soluzioni individuate. Sono indici pertanto che possono essere inferiori o maggiori dell'unità.

Diverso è l'approccio che si è riscontrato negli indici presentati nella memoria di Pacot, e Reiter, in cui vengono introdotti indici di prestazione sia lato generazione che lato distribuzione del calore, valutati quali rendimenti, ovvero dal rapporto dell'effetto utile rispetto alla spesa energetica complessiva. A differenza dei Primary Energy Factors, gli indici di Pacot e Reiter si possono considerare anche quantitativamente significativi nella valutazione delle prestazioni del sistema impianto - rete, e sono sempre inferiori all'unità.

Tabella 107.Confronto tra i casi esempio considerati

Caso	Configurazione		Primary Energy Factors (PEF)	Non-Renewable Primary Energy Factor (PEF_{NR})	η_G
1	Caldaia GN		1,111	1,111	0,9
2	CHP		0,478	0,478	0,850
3	Calore di scarto		1,050	0	0,952
4	caldaia GN + calore di scarto	10% rinn	1,105	1	0,909
		20% rinn	1,099	0,889	0,918
		30% rinn	1,093	0,778	0,928
5	CHP + calore di scarto	10% rinn	0,535	0,430	0,526
		20% rinn	0,593	0,383	0,556
		30% rinn	0,650	0,335	0,588
6	Solare termico		1	0	1
7	Caldaia biomassa		1,111	0	0,9
8	Caldaia GN + solare termico	10% rinn	1,100	1	0,909
		20% rinn	1,089	0,889	0,918
		30% rinn	1,078	0,778	0,928
9	CHP + solare termico	10% rinn	0,530	0,430	0,858
		20% rinn	0,583	0,383	0,867
		30% rinn	0,635	0,335	0,876
10	Caldaia GN + caldaia a biomassa	10% rinn	1,111	1	0,9
		20% rinn	1,111	0,889	0,9
		30% rinn	1,111	0,778	0,9
11	CHP + caldaia biomassa	10% rinn	0,541	0,430	0,853
		20% rinn	0,605	0,383	0,856
		30% rinn	0,668	0,335	0,860

La seconda parte delle attività svolta presso il politecnico di Torino è stata dedicata alla progettazione preliminare di un sistema di monitoraggio energetico remoto, in tempo reale, dell'impianto di cogenerazione e della rete di teleriscaldamento di un quartiere di Torino. La natura della rete, oltre che la tipologia degli strumenti di misura già esistenti al momento dell'analisi, hanno portato a valutare l'adozione di un sistema di monitoraggio basato su strumenti in grado di comunicare via onde radio con i concentratori dati che verranno installati. Questa soluzione ha permesso di ottimizzare notevolmente la flessibilità d'uso del sistema, contenendone sensibilmente i costi di realizzazione. Si è reso necessario individuare le attrezzature necessarie al rilevamento, all'eventuale elaborazione e alla trasmissione dei dati raccolti dagli strumenti di misura installati lungo la rete, che saranno poi utilizzati dal sistema di supervisione. La soluzione tecnica ottimale che è stata individuata consiste in un sistema di monitoraggio remoto a due livelli:

- installazione di strumenti di misura in centrale termica (posizionata al piano interrato della palazzina uffici che ospita la direzione tecnica del gestore); tali strumenti verranno cablati in Modbus e collegati via cavo al datalogger centrale;
- installazione di misuratori di energia termica nei vari pie di stabile lungo la rete; a causa delle difficoltà di cablaggio, e della vetustà di alcuni di essi, tali misuratori verranno collegati ad un sistema di trasmissione dati via onde radio, che permetterà la comunicazione con il datalogger centrale.

Uno schema dell'architettura del sistema che verrà realizzato sull'impianto del gestore è riportato in Figura 384.

Le due uniità M501 saranno dedicate una alla centrale termica, e l'altra alla raccolta dei dati relativi ai piè di stabile. La prima raccoglierà le misurazioni relative al funzionamento in tempo reale della centrale termica ed invierà i dati, tramite protocollo ethernet (LAN) + FTP/IP, al terminale di post-processing dei dati (sistema SCADA); la seconda, invece, sarà installata nell'edificio centrale (edificio del gestore) e avrà funzione di DATA HUB, cioè raccoglierà tutte le informazioni inviate tramite segnali radio relative ai piè di stabile e le invierà, tramite

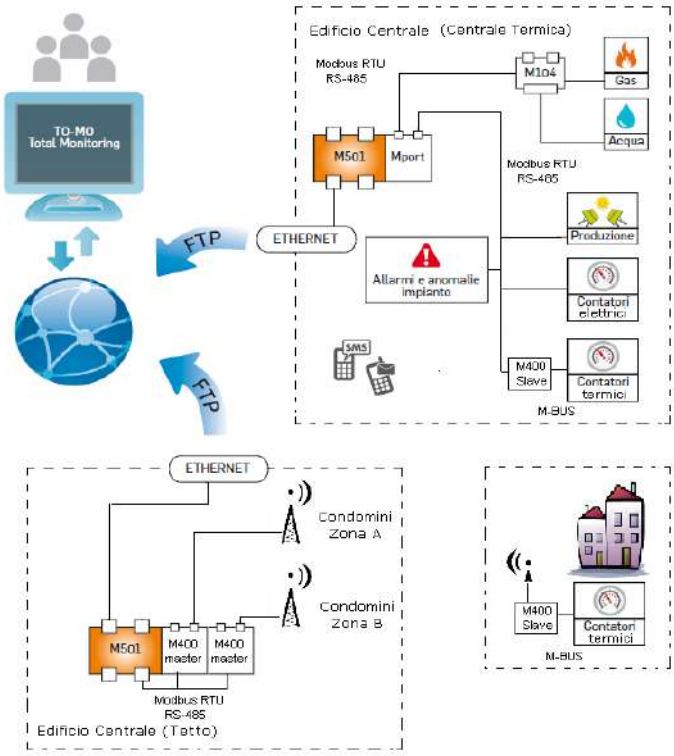


Figura 384. Architettura sistema di monitoraggio

protocollo ethernet, allo stesso terminale di post-processing

I segnali compatibili con l'M501 sono essenzialmente di due tipi: impulsivo o secondo il protocollo ModBus. Mentre i contatori di produzione elettrica installati dal gestore in centrale termica prevedono segnali in uscita di tipo impulsivo, già compatibili con l'M501, la lettura dei contatori di energia termica avviene tramite protocollo Mbus (MeterBus). E' quindi necessario un convertitore Mbus\ModBus che renda i dati in output dal contatore termico compatibili con il modulo M501. I contatori di gas metano e acqua dell'impianto, similmente ai conta termie, producono segnali digitali che non sono direttamente compatibili con l'M501. E' necessaria, pertanto, una unità di espansione segnali digitali (M104) che gestisca lo stato degli ingressi e renda tali segnali compatibili con l'M501. Tale sistema verrà presumibilmente messo in funzione a partire dall'anno termico 2014-15, consentendo la validazione sperimentale delle analisi di performance presentate nella parte iniziale del presente studio.

Una descrizione delle attività svolte dal Politecnico di Torino è riportata nel rapporto RdS/PAR2013/056.

Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Industriale

L'attività svolta dall'Università di Bologna, con riferimento al subtask a.2 si è concentrata sullo studio di reti di teleriscaldamento attive ovvero integrate con sistemi decentralizzati di produzione termica (da fonte rinnovabile o in assetto cogenerativo) e caratterizzate da sottostazioni presso le utenze in grado di scambiare bidirezionalmente energia termica. I principali risultati raggiunti sono sintetizzati nel seguito.

Si è proceduto alla definizione di quattro lay-out, per quanto riguarda le sottostazioni di una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento finalizzati allo scambio bidirezionale di energia termica tra rete ed utenza. Tali layout, riportati in Figura 385. dal punto di vista della cessione di energia termica dall'utenza verso la rete di distribuzione, sono così identificati:

a. *schema 1 (mandata-ritorno)*: preleva una portata dal circuito di mandata e la immette (a temperatura maggiore) sul circuito di ritorno;

b. *schema 2 (mandata-mandata)*: in questo caso, si preleva una portata dal circuito di mandata e la si immette (sempre a temperatura maggiore) sullo stesso circuito;
c. *schema 3 (ritorno-ritorno)*: la cessione di energia termica alla rete è fatta agendo esclusivamente sul circuito di ritorno;
d. *schema 4 (ritorno-mandata)*: in quest'ultimo caso, l'utenza incrementa la temperatura di una portata che dal circuito di ritorno della rete di distribuzione è immessa nuovamente sulla mandata.

Gli schemi (Figura 385) sono stati elaborati prevedendo già delle strategie per quanto riguarda le logiche e le modalità di scambio dell'energia termica tra rete ed utenza. Infatti, in tutti e quattro gli schemi proposti si assume che l'immissione di energia termica in rete avvenga esclusivamente nel caso la produzione del sistema decentralizzato sia superiore al fabbisogno dell'utenza.

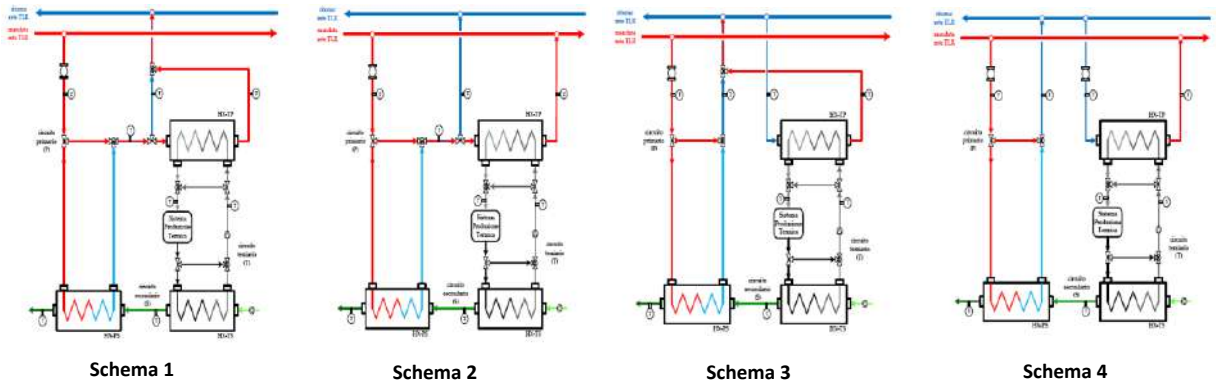


Figura 385. Schemi di scambio attivo tra un sistema di produzione termica e rete di teleriscaldamento

È stato realizzato un nuovo software, chiamato IHENA 1.0 (**I**ntelligent **H**eat **E**nergy **N**etwork **A**nalysis) in grado di simulare, con approccio stazionario, una rete di teleriscaldamento e/o di teleraffrescamento con utenze di tipo attivo. Il software, scritto in VBA con interfaccia in Microsoft Excel, è in grado di calcolare le portate, le pressioni, le temperature di una generica rete di distribuzione termica di tracciato noto. Il nuovo software è stato ricavato dal Ca.R.Di.F. 5.2 (Calcolo Reti Distribuzione Fluidi), già scritto dall'Università ed adatto solo per la simulazione di reti di teleriscaldamento e/o teleraffrescamento tradizionali. Il motore di calcolo del nuovo software è basato, come già il Ca.R.Di.F. 5.2, sull'algoritmo di Todini-Pilati generalizzato dall'utilizzo delle equazioni di Darcy-Weisbach.

È stata condotta una prima serie di simulazioni finalizzate a comprendere meglio il funzionamento di una sottostazione di un'utenza attiva in ragione degli schemi 1 - 4, elaborati. Le simulazioni, eseguite senza definire una rete di distribuzione (considerando solo una direttrice di mandata ed una di ritorno), sono state svolte variando sia il rapporto tra il fabbisogno dell'utenza ($Q_{TH,U}$) e la potenza termica disponibile dal sistema di produzione ($Q_{TH,SP}$), che il rapporto tra la portata circolante nel circuito primario (M_P) e quella circolante nel terziario (M_T); sono stati inoltre considerati due valori distinti di temperatura della direttrice di mandata, rispettivamente pari ad 80 e a 90°C. Le simulazioni condotte hanno permesso di comprendere quanto segue:

a. nel caso di impiego dello schema 1 (mandata-ritorno), l'incremento del rapporto $Q_{TH,U}/Q_{TH,SP}$ comporta la riduzione del salto di temperatura conseguibile; lo stesso comportamento si osserva se a parità di rapporto $Q_{TH,U}/Q_{TH,SP}$ si incrementa il rapporto tra la portata circolante nel primario e quella circolante nel terziario;
b. in ragione delle ipotesi alla base della simulazione, lo schema 2 (mandata-mandata) presenta lo stesso comportamento, tanto dal punto di vista qualitativo che quantitativo, osservato nel caso dello schema 1;
c. l'impiego dello schema 3 (ritorno-ritorno) consente di ottenere salti di temperatura maggiori (a parità di sistema di produzione) rispetto ai due casi precedentemente esposti;
d. infine, con lo schema 4 (ritorno-mandata) si rileva un riduzione del campo di funzionamento, in confronto allo schema 3, in termini di rapporto $Q_{TH,U}/Q_{TH,SP}$ che si riduce a valori compresi tra 0.0 e 0.7 (nel caso M_P/M_T=2.0);
e. l'incremento della temperatura della direttrice di mandata implica, a parità di altre condizioni, una riduzione del salto di temperatura conseguibile; tali risultati non sono riportati nel presente documento per brevità: per maggiori dettagli si rimanda pertanto al rapporto RdS/PAR2013/053.

Si è quindi proceduto ad effettuare una serie di simulazioni, finalizzate a comprendere il comportamento di un'utenza di tipo attivo, all'interno di una rete di teleriscaldamento. A tal fine è stata considerata una rete reale semplificata (Figura 386) costituita da 27 nodi, 26 rami, 11 utenze (di cui una attiva, #12) ed una sorgente per una lunghezza complessiva pari a poco più di 3 km. Le simulazioni sono state condotte considerando tre diversi livelli di temperatura di immissione dalla centrale (70, 80 e 90 °C) e tutti e quattro gli schemi di utenza attiva ipotizzati. I risultati ottenuti sono stati confrontati con un caso di riferimento (caso base) caratterizzato solo da utenze di tipo passivo. In Tabella 108 è presentata una sintesi dei casi simulati.

Tabella 108. Riepilogo delle simulazioni svolte

Rete		Tipologia di schema considerato			
T mand. [°C]	**T rit. [°C]**	**Schema 1**	**Schema 2**	**Schema 3**	**Schema 4**
80	**60**	CASO 1.1	CASO 1.2	CASO 1.3	CASO 1.4
70	**50**	CASO 2.1	CASO 2.2	CASO 2.3	CASO 2.4
90	**60**	CASO 3.1	CASO 3.2	CASO 3.3	CASO 3.4

Le simulazioni svolte, permettono di sintetizzare le seguenti considerazioni, relativamente all'impiego delle utenze attive:

a. lo schema 1 (mandata-ritorno) comporta incrementi di temperatura dell'acqua che rientra in centrale con conseguente riduzione e/o necessità di regolazione dei sistemi di produzione centralizzati;
b. lo schema 2 (mandata-mandata) è responsabile invece dell'aumento di temperatura sulla direttrice di mandata; tale eventualità potrebbe in ogni caso non essere gradita a chi gestisce la rete che potrebbe quindi non facilmente mantenere il controllo delle temperature della rete di distribuzione;
c. lo schema 3 (ritorno-ritorno) presenta le stesse problematiche dello schema 1, ma con un lay-out impiantistico più complesso del succitato caso;

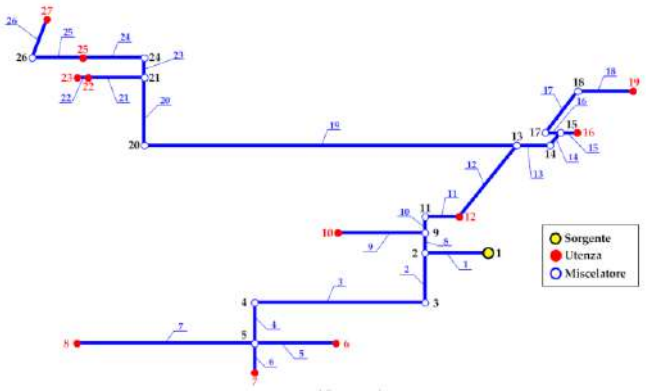


Figura 386. Mappa della rete simulata

d. lo schema 4 (ritorno-mandata) è una configurazione che presenta il vantaggio di permettere l'immissione di energia termica in rete anche senza alterare la temperatura della direttrice di mandata; ovviamente lo schema 4 altera le portate circolanti e pertanto richiede anche in questo caso degli interventi da parte della centrale.

Per valutare la convenienza economica che è possibile raggiungere con una rete attiva rispetto ad una tradizionale rete di teleriscaldamento passiva è stata condotta (per diversi rapporti tra la potenza di picco del sistema di produzione e quella richiesta dall'utenza variabili tra 1,0-SP#1 e 0,2-SP#5) un'analisi parametrica al variare del rapporto tra il costo di acquisto dell'energia termica dalla rete (C_p) e il prezzo corrisposto all'utenza per l'immissione dell'energia prodotta (V_{imm}). I risultati delle analisi condotte sono presentati in Figura 387.

Il caso in analisi è quello nell'ipotesi che la proprietà del sistema di produzione decentralizzato sia dell'utente. Il rapporto C_p/V_{imm} è stato fatto variare tra 2,00 e 1,25, considerando quindi che il costo per l'acquisto dell'energia termica sia sempre superiore al prezzo riconosciuto per l'immissione in analogia a quanto avviene per il mercato elettrico. Inoltre, si è considerata la possibilità che il sistema di produzione sia di proprietà oltre che

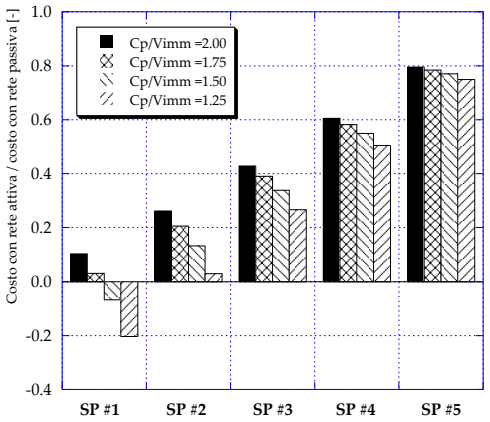


Figura 387. Variazione del costo in funzione del rapporto tra il prezzo di acquisto del termico ed il prezzo corrisposto per l'immissione

dell'utenza, di una ESCO o del gestore stesso della rete. Tutti i casi studiati hanno permesso di individuare le possibili condizioni di conseguimento di un vantaggio economico da parte del proprietario del sistema di produzione decentralizzato. Va comunque sottolineato che le maggiori complicazioni di gestione di una rete attiva, legate soprattutto alla difficoltà di prevedere quantitativamente e temporalmente l'immissione in rete di energia termica, rendono più auspicabile che la proprietà dei sistemi di produzione decentralizzati sia del gestore stesso della rete. In ogni caso, tale eventualità comporterebbe una migliore efficienza energetica ed una maggiore qualità del servizio; i risparmi energetici ed economici conseguenti a tale gestione potrebbero pertanto anche ricadere su una riduzione delle tariffe sostenute dagli utenti per il servizio termico.

Una descrizione dettagliata dell'attività dell'Università di Bologna è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/053.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Energetica ed Elettrica

L'attività del Dipartimento DIAEE dell'Università Sapienza, con riferimento al subtask a.2 ha avuto per oggetto lo sviluppo di un modulo software che è stato integrato all'interno della piattaforma software di simulazione delle reti di teleriscaldamento in corso di realizzazione da parte di ENEA, allo scopo di analizzare le potenzialità di ampliamento dei servizi energetici erogabili introducendo nuovi servizi ancillari.

L'attività svolta risulta innovativa rispetto agli studi esistenti in quanto presenta analisi specifiche (validate tramite test sperimentali) sui consumi di singoli dispositivi di tipo industriale oltre che domestico. Le voci di consumo sono inoltre scomposte secondo gli usi finali necessari al dispositivo (i.e. riscaldamento acqua o forza motrice) e sono inoltre presentati modelli di aggregazione ad hoc in base al tipo di utenza (residenziale, alberghiera etc.) basati su rilievi sperimentali.

L'attività è stata organizzata in due fasi. La prima fase (fase A) ha riguardato l'analisi sperimentale dei profili di carico elettrici e termici dei dispositivi che utilizzano acqua calda (lavabiancheria e lavastoviglie), allo scopo di ricavare il profilo di richiesta termica dei dispositivi, prendendo in considerazione sia apparecchi per uso "residenziale" che per uso "non residenziale". Come caso "non residenziale" sono stati considerati una struttura alberghiera, una mensa aziendale ed esercizi di ristorazione commerciale. La seconda fase (fase B) ha riguardato lo sviluppo di modelli per il calcolo del profili di carico termico degli utilizzatori elettrotermici aggregato a livello di edificio e la valutazione dell'impatto del carico sulla rete di teleriscaldamento TLR. Successivamente è stata eseguita l'implementazione dei modelli di simulazione in ambiente MATLAB-Simulink.

Analisi dei profili di carico termici delle utenze elettrotermiche

Caratterizzazione e validazione sperimentale. Allo scopo di caratterizzare i profili di carico termico ed elettrico degli utilizzatori elettrotermici, è stata svolta un'ampia campagna di misura dei consumi istantanei degli elettrodomestici, che ha consentito di valutare la frazione di carico dedicata al riscaldamento dell'acqua nei lavaggi. Attualmente la produzione di acqua calda negli utilizzatori elettrotermici è elettrica in ambito residenziale mentre è elettrica o tramite caldaia in ambito "non residenziale", quindi la frazione di carico associata è inclusa nei consumi di energia elettrica o di combustibile e non sono disponibili in letteratura analisi specifiche. Lo studio ha permesso quindi di ampliare i dati in letteratura. Risultati della fase A sono stati quindi il disaccoppiamento del profilo di carico secondo gli usi finali di riscaldamento e forza motrice (FM) e l'estrapolazione del profilo di richiesta di calore di ogni tipo di dispositivo per le varie tipologie di edificio.

L'attività di monitoraggio è stata svolta presso differenti tipologie di utenze:

- utenze residenziali private
- esercizi di ristorazione commerciale
- struttura alberghiera
- esercizio di ristorazione aziendale.

Lo studio ha permesso di caratterizzare il profilo di carico elettrico e di temperatura del singolo dispositivo e di estrapolare il profilo di carico termico inerente i servizi ancillari. L'estrapolazione è stata effettuata sperimentalmente associando l'uso FM al valore di base del profilo di carico elettrico misurato e l'uso riscaldamento al valore di picco, validandoli con la rilevazione diretta in tempo reale delle fasi del lavaggio. Il monitoraggio ha riguardato:

- lavastoviglie (LS) domestiche
- lavatrici (LV) domestiche
- lavastoviglie (LS) industriali
- lavatrici (LV) industriali.

In ambito residenziale il monitoraggio dei dispositivi è stato eseguito rilevando il profilo di carico elettrico attraverso logger di corrente monofase inserito via pinze amperometriche sui conduttori di alimentazione. I risultati sono riportati in Figura 388 e 389.

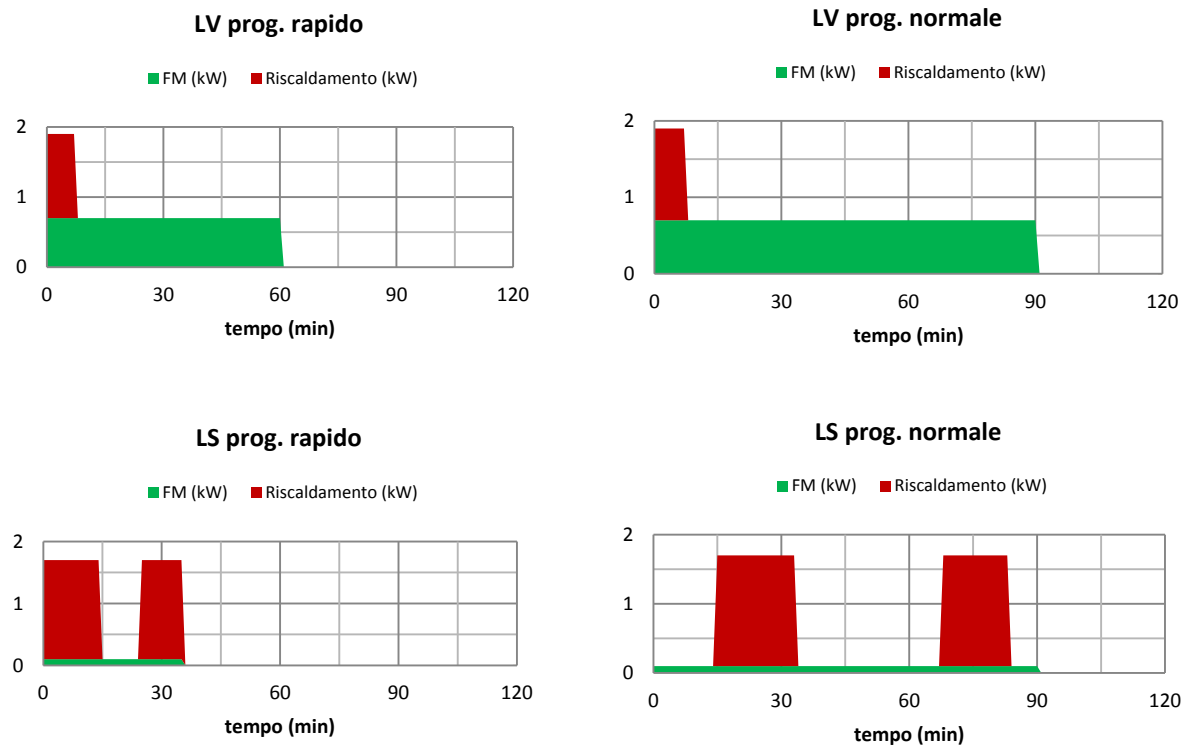


Figura 388. Profili di carico elettrico rilevati per singolo ciclo di lavaggio di elettrodomestici residenziali: individuazione della frazione di carico per produzione di acqua calda residenziale

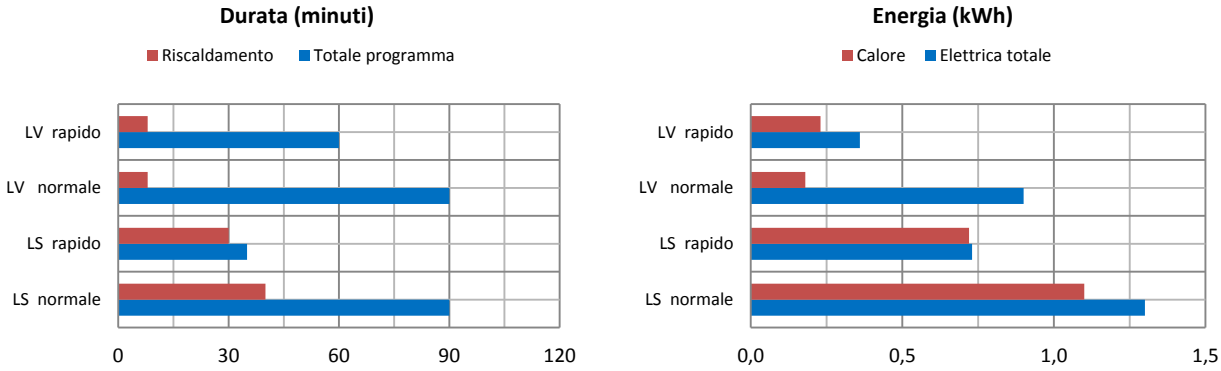


Figura 389. Caratterizzazione energetica degli elettrodomestici monitorati in ambito residenziale (per dispositivo e tipo di programma)

In ambito "non residenziale" il monitoraggio dei dispositivi è stato eseguito rilevando il profilo di carico elettrico attraverso logger di corrente trifase, inserito via pinze, e l'andamento delle temperature caratteristiche attraverso logger di temperatura, inserito via sonde installate sulle tubazioni. Inoltre è stata eseguita un'analisi della struttura, con riferimento ai dispositivi in dotazione e alle caratteristiche dell'esercizio e della struttura, attraverso indagini in collaborazione con il personale esperto. Sono stati monitorati il servizio lavanderia e il servizio mensa dipendenti di una struttura alberghiera ad alta capacità ricettiva. I risultati sono riportati in Figura 390. Infine sono stati monitorati degli esercizi ristorativi commerciali e la mensa del C.R. ENEA Casaccia. Attraverso rilevamenti sperimentali è stata caratterizzata l'utenza (caratteristiche della struttura, dei dispositivi in dotazione e dell'esercizio) e sono stati elaborati i consumi di combustibile della centrale termica per la produzione di acqua

calda correlati alle dimensioni e alle caratteristiche d'esercizio. In Figura 391 si riportano i risultati del monitoraggio termico della mensa ENEA.

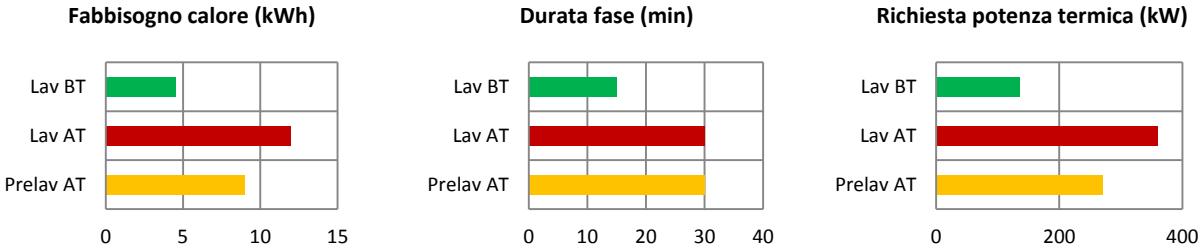


Figura 390. Dati di sintesi del servizio di lavanderia alberghiero

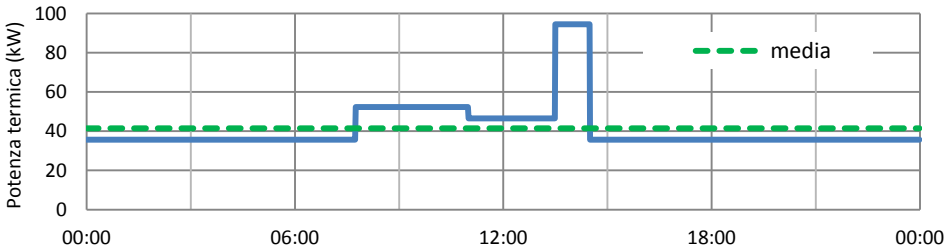


Figura 391. Monitoraggio termico mensa ENEA: profilo orario del carico termico per la produzione di acqua calda tramite boiler

È stata inoltre eseguita una valutazione dei costi associati alla produzione acqua calda per utilizzatori elettrotermici, associati alle tipologie di dispositivo e ai programmi di funzionamento (Figura 392).

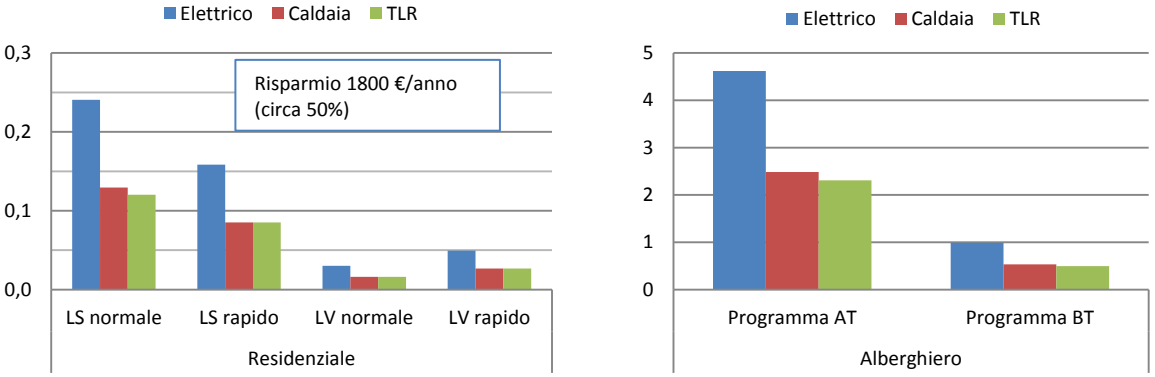


Figura 392. Costi produzione acqua calda per utilizzatori elettrotermici residenziali e alberghieri

Ottimizzazione dei profili termici e integrazione in piattaforma software di simulazione reti di teleriscaldamento

Integrazione. La seconda fase della attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo, in ambiente MATLAB-Simulink, di algoritmi di simulazione dei profili termici degli utilizzatori elettrotermici delle utenze, aggregati a livello di edificio, facendo uso di tecniche Montecarlo-based. L'ambiente grafico Simulink, integrato con l'ambiente di calcolo MATLAB, ci ha consentito di realizzare molteplici modelli dinamici di simulazione del carico termico degli utilizzatori all'interno del sistema edificio.

Al fine di ottenere i profili termici aggregati degli utilizzatori, sono stati sviluppati più algoritmi-tipo, ciascuno ottimizzato per simulare più fedelmente una particolare tipologia di utenza. In ambito residenziale i profili dei dispositivi vengono aggregati secondo una distribuzione gaussiana intorno agli orari di massima probabilità di utilizzo, introducendo componenti casuali, al fine di tenere conto delle variazioni aleatorie che caratterizzano l'uso. In ambito alberghiero vengono aggregati i profili dei dispositivi secondo un profilo di utilizzazione rilevato sperimentalmente, anche in questo caso introducendo componenti casuali, per tener conto delle variazioni

aleatorie. In ambito commerciale i profili dei dispostivi vengono aggregati secondo un profilo di esercizio, generato in tempo reale, in base a parametri rilevati sperimentalmente integrati con variazioni aleatorie. Gli algoritmi sviluppati consentono di generare profili aggregati ad hoc secondo il tipo e la dimensione dell'edificio (in Figura 393 si riporta un profilo tipico per edificio residenziale da 16 unità abitative dotate di LV e LS).

Inoltre i modelli realizzati hanno permesso di confrontare il carico servizi ancillari in rapporto al servizio principale di riscaldamento (e.g. in Figura 394 si riporta il confronto per l'edificio residenziale citato).

Ottimizzazione. Sono state analizzate varie strategie di ottimizzazione dei carichi ed è stata individuata come opportuna strategia la rimodulazione del profilo di utilizzazione dei dispositivi, finalizzata a un matching con il profilo produzione di calore da solare termico, al fine di massimizzare lo sfruttamento di fonte rinnovabile termica. È stata condotta una analisi delle varie tecniche di implementazione delle strategie di ottimizzazione ed è stata implementata la tecnica di concentrazione dell'uso dei dispositivi negli orari di massima produzione da solare termico attraverso una nuova distribuzione statistica intorno a tali orari (figura 395).

I vantaggi emersi dalla strategia studiata consistono nello sfruttare maggiormente il calore prodotto da fonte rinnovabile (solare termico), per di più in orari della giornata in cui sarebbe sottoutilizzato.

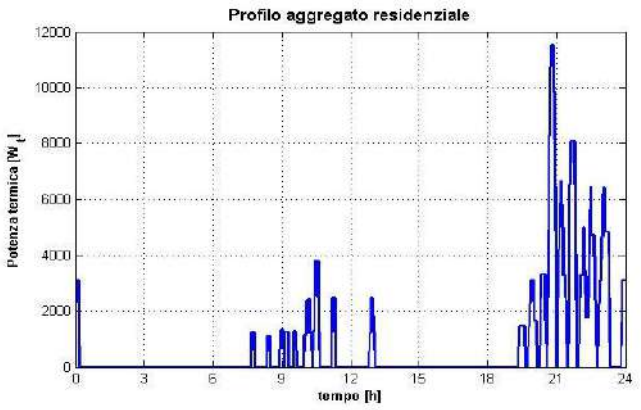


Figura 393. Profilo di carico termico giornaliero degli utilizzatori elettrotermici aggregato per una utenza esemplificativa

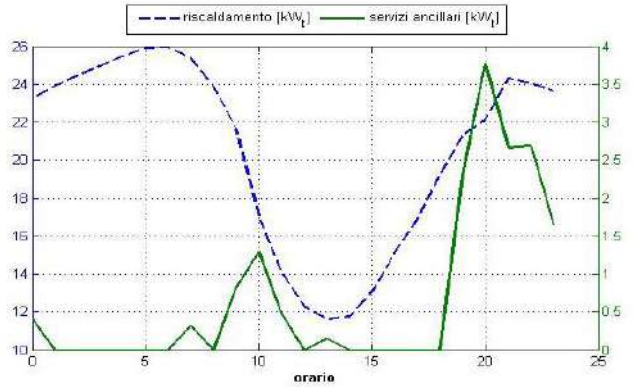


Figura 394. Confronto tra profilo di carico termico riscaldamento e servizi ancillari (16 unità abitative, giornata invernale)

Gli algoritmi sviluppati nel presente lavoro sono stati implementati in modelli di simulazione programmati in ambiente MATLAB-Simulink ed è stato prodotto un pacchetto che simula il profilo orario di carico termico aggregato dei dispostivi nel corso dell'anno (Figura 396). Il pacchetto è stato inserito nella piattaforma software che calcola il carico termico dell'edificio.

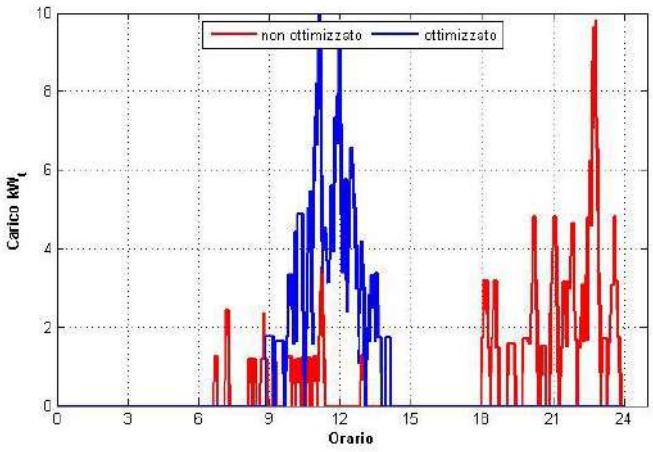


Figura 395. Confronto dei profili di carico termico servizi ancillari in caso ottimizzato (blu) e non ottimizzato (rosso) (edificio residenziale da 16 unità abitative)

Modello simulazione carichi termici edifici

Modello simulazione carico servizi ancillari (combinazione utenze compresenti in edifici)

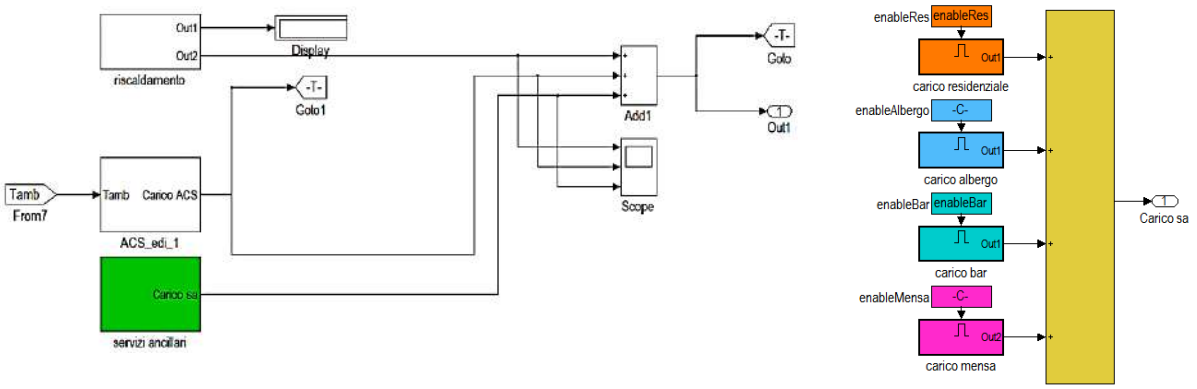


Figura 396. Pacchetto MATLAB Simulink integrato nella piattaforma

Lo studio ha prodotto un modulo software utile alla simulazione dei profili di carico di utenze elettrotermiche, allo sviluppo di soluzioni gestionali innovative per la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento e alla valutazione del risparmio energetico ed economico conseguibile. Alla luce dello studio condotto, si ritiene che le reti di teleriscaldamento possano fornire nuovi servizi ancillari nell'ottica di una evoluzione energetica ed economica delle reti stesse. Ciò consentirebbe un risparmio di energia elettrica e di combustibile per l'utente con conseguente risparmio economico, e contestualmente la possibilità per il gestore della rete di teleriscaldamento TLR di fornire nuovi servizi al fine di ottimizzare l'uso della rete TLR anche in periodi di basso carico dal momento che i servizi di lavaggio funzionano durante tutto il corso dell'anno. Inoltre ciò offre la possibilità di integrare più facilmente fonti rinnovabili termiche (e.g. solare termico a bassa temperatura) verso lo sviluppo di una filiera energetica più armonizzata.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/059.

Seconda Università di Napoli, Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

In continuità con quanto sviluppato nella precedente i temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Seconda Università di Napoli (SUN) 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. In tale contesto si è proceduto allo studio delle possibili soluzioni progettuali e gestionali che consentano l'implementazione di una rete di smart multi-metering includendo, anche, la sua caratterizzazione metrologica e la validazione funzionale.

Obiettivo dell'attività, inserita nell'obiettivo a (subtask a.2) è stato, quindi, la realizzazione e caratterizzazione di un prototipo di concentratore dati che garantisca la ricezione dei dati utilizzando moderni approcci per la trasmissione in sicurezza e la verifica di accuratezza ed affidabilità del dato attraverso l'analisi combinata delle letture in differenti punti della rete. Il prototipo realizzato ha consentito di individuare e testare metodologie e strumenti di analisi delle prestazioni di reti di smart meter che utilizzano comunicazioni PLC per la trasmissione dei dati al concentratore.

Il primo obiettivo, quindi, è stato quello di implementare un concentratore dati, componente essenziale per una rete di smart meter. Esso supporta l'infrastruttura collegando più contatori (elettricità, gas, acqua, etc.) a un server centrale ed effettuando operazioni di acquisizione e reporting di dati. Il concentratore dati consente di sincronizzare date e tempi dei contatori con il server centrale e il trasferimento sicuro delle informazioni relative alla cifratura e all'autenticazione dell'utente. Esso permette di avere a disposizione tutti i dati inviati periodicamente dai vari *Smart Meter* della *Smart Grid*, attraverso un software di gestione, e questo rende più facile l'individuazione di eventuali guasti nella rete e con un azione automatica del software di controllo può prevenire la rottura di dispositivi appartenenti a quel nodo. La visualizzazione dei dati inviati può avvenire anche tramite Internet, utilizzando le opportune credenziali per accedere al database della pagina web del concentratore dati. La comunicazione con i contatori avviene attraverso una connessione RF o cablata (*modem powerline,* PLC)

sfruttando protocolli quali *Ethernet, Gsm, Gprs* o *Pots*. Nelle attività di progetto ci si è occupati dell'analisi e sviluppo di metodologie e strumenti di analisi delle prestazioni del concentratore dati. A tal fine si è utilizzato un *Raspberry Pi* come concentratore dati collegato ad uno Smart Meter per monitorare i dati acquisiti e renderli disponibili all'utente.

Nella fase preliminare alla progettazione, è stato eseguito uno studio approfondito dei componenti scelti per la realizzazione del concentratore dati.

I dati da prelevare dagli Smart Meter possono essere trasmessi dal misuratore al concentratore di dati attraverso le linee elettriche, cioè con modem Power Line Communication, la motivazione di tale scelta risiede nel fatto che questa tecnologia è più sicura contro manipolazioni esterne. Infatti, poiché il PLC è un "tecnologia wired", per effettuare un attacco esterno un utente deve essere in grado di collegarsi fisicamente alla rete. Inoltre la rete proposta necessita di un basso consumo di energia e di un bit rate basso, essendo bassa anche la quantità di dati trasmessi in rete. Per interfacciare i componenti della rete con i modem PLC si è scelto il canale di comunicazione bidirezionale RS-232 per la trasmissione dei dati, ovvero il canale di comunicazione seriale che è presente in entrambi i componenti. L'RS-232 è uno standard che definisce un'interfaccia di livello fisico del modello ISO/OSI per la realizzazione di una trasmissione seriale, sia in modalità sincrona che asincrona. L'interfaccia RS-232 ridotta (porta seriale a 9 pin) utilizza solo protocolli di trasmissione di tipo asincrono. Per trasmissione "seriale" si intende che i bit, che costituiscono l'informazione, sono trasmessi uno alla volta su di un solo "filo". La sensibilità del tipo di dati e l'affidabilità del controllo all'interno di una rete di Smart Meter richiede come requisito fondamentale la sicurezza informatica della rete di comunicazione. Per questo motivo si è scelto come algoritmo di crittografia l'Advanced Encryption Standard (AES-128 bit). L'AES è una specifica per la crittografia dei dati elettronici stabiliti dal US National Institute of Standards and Technology (NIST) nel 2001. AES è basato su un principio di progettazione conosciuto come una rete a sostituzione e permutazione ed è veloce sia software che hardware. Il passo successivo è stato quello di analizzare la modalità di trasmissione dei dati scelta, cioè lo standard RS-232. Attraverso lo studio del microcontrollore STM32F407 e il suo linguaggio di programmazione, si è appreso che questa può essere effettuata utilizzando varie tipologie di dati, ovvero di tipo float, intero o con le stringhe. Tra i vari tipi di trasmissione dati si è scelto di utilizzare quella con l'invio di float e interi, per garantire una buona gestione e manipolazione tramite il Python. Il formato dei dati da trasmettere è rappresentato in Tabella 109.

Tabella 109. Format dati

Parameter	*Type*	*Unit*	*Description*
ID	int (4 Byte)	-	Node identificator with 4 field
RMSv	float (4 Byte)	V	Voltage Root Mean Square
RMSi	float (4 Byte)	A	Current Root Mean Square
fs	float (4 Byte)	Hz	Voltage Frequency
eA	float (4 Byte)	Wh	Active Energy
eR	float (4 Byte)	VARh	Reactive Energy
P	float (4 Byte)	W	Active Power
Q	float (4 Byte)	VAR	Reactive Power
PF	float (4 Byte)	-	Power Factor
THDv	float (4 Byte)	%	Voltage Total Harmonic Distortion
THDi	float (4 Byte)	%	Current Total Harmonic Distortion

Il formato di dati è composto da un campo " ID " che è l'identificatore del nodo nella rete locale e dai 10 parametri elencati. Come illustrato in tabella, l'identificatore è composto da 4 byte di tipo intero e gli altri parametri sono composti da 4 byte di tipo Float. La dimensione totale del pacchetto dati è di 44 byte. Poiché i dati sono cifrati con AES 128, la dimensione finale del pacchetto è 64 byte. La scelta di utilizzare il Python, come linguaggio di programmazione per l'implementazione dell'applicazione del concentratore dati (Raspberry Pi), è stata presa per due motivi. Il primo è dovuto al fatto che esso è presente nel Raspberry Pi come linguaggio di sviluppo del pc all'interno del sistema operativo Raspbian ovvero una versione port del Debian. Il secondo, di maggiore importanza, è perché esso permette una connessione diretta al database MySQL, dovuta alla sua integrabilità con quest'ultimo. La connessione a questo linguaggio di programmazione è risultata fondamentale anche per un altro aspetto, perché l'idea del progetto oltre che alla realizzazione di un'applicazione di monitoraggio, prevede anche il salvataggio dei dati e la possibilità di poterli consultare da remoto, tramite l'utilizzo di un comune browser.

È stata infine condotta una campagna di analisi al fine di sviluppare metodologie e strumenti di analisi delle prestazioni per l'architettura di rete di smart meter proposta. In particolare sono stati affrontati i seguenti aspetti:

- calcolo del bit error rate in funzione di vari parametri, quali velocità di trasmissione e lunghezza dei frame trasmessi;

- caratterizzazione del canale in termini di risposta in frequenza e di livelli di attenuazione esistenti.

Per prima cosa, è stato analizzato il bit error rate (BER) calcolato mediante misure effettuate sul modem. E' stato necessario impiegare due modem: uno per la trasmissione, l'altro per la ricezione (va specificato che si è scelto di utilizzare un baud rate pari a 1200). Tramite un mixer, viene aggiunto rumore bianco all'uscita (del trasmittente. Lo scopo è quello di evidenziare l'andamento del BER al variare del rapporto segnale/rumore. L'uscita del mixer è posta all'ingresso (RAI, Receive Analog Input) del modem ricevente. Tramite un "BER Analyzer" (con clock asincrono interno pari a 1,2 kHz) viene generato un segnale digitale pseudo-random che viene posto all'ingresso (TXD) del trasmittente. In uscita (CRX) al blocco di ricezione viene generato un segnale di clock a 1,2 kHz tramite il segnale MCLK proveniente dal ricevente. Il segnale digitale (RXD) all'uscita di quest'ultimo viene, quindi, amplificato (RXDL) e sincronizzato con il segnale di clock CRX. Questi due segnali vengono poi inviati al BER Analyzer. Le misure sono state ottenute adoperando due diversi valori del RAI, ovvero 10,023 e 1,14 mV_{RMS} (Figure 397).

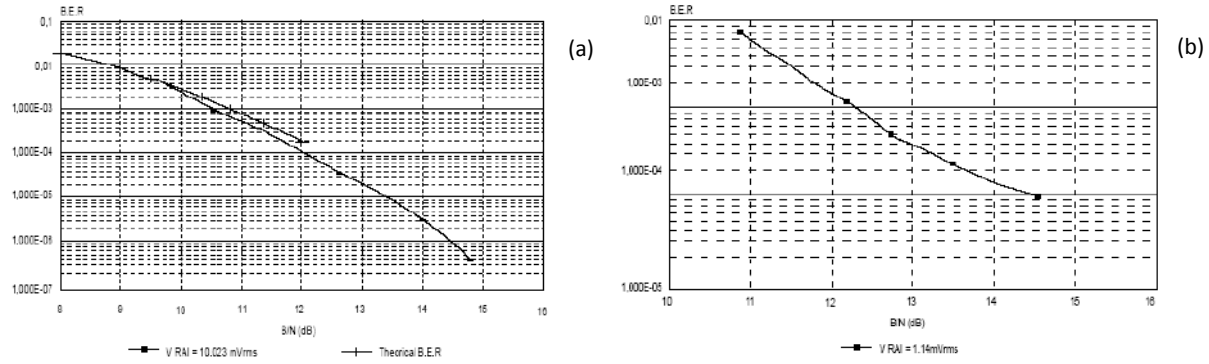


Figura 397.BER per RAI pari a 10,023 mV_{RMS} (a) e 1,14 mV_{RMS} (b)

Dai valori riportati, si evince che con un RAI di 10 ed un S/N pari a 15 dB il BER vale 10^{-7}, mentre con lo stesso S/N ed un RAI di 1,14 il BER si aggira intorno a 10^{-4}. Ad ogni modo, il modem è in grado di comunicare con bassi livelli del segnale d'ingresso (RAI), ovvero nell'intorno 1.

Il BER misurato è stato quindi confrontato con quello teorico di un tipico modem a modulazione BFSK. I bit rate utilizzati nell'analisi sono stati i seguenti: 600, 1200 e 2400 bps. La lunghezza dei frame trasmessi è stata anch'essa variabile: sono stati inviati, per ogni misura, bit, sotto forma di pacchetti di 22, 52, 112 e 125 byte ciascuno. Questi valori sono stati scelti a piacere, ma comunque la scelta è stata vincolata dal fatto che sulla porta seriale (utilizzata per connettere il modem al calcolatore) non potevano viaggiare più di 127 byte. I valori di BER ottenuti sono stati:

byte/bps	2400	1200	600
22	2,49E-03	1,00E-05	1,00E-07
52	6,14E-03	4,16E-05	4,20E-06
112	1,29E-02	1,91E-05	
125	1,37E-02		

Sono stati analizzati l'andamento del BER in funzione della lunghezza dei frame per diversi valori del bit rate e al variare della velocità di trasmissione per differenti lunghezze dei pacchetti. Gli andamenti ottenuti sperimentalmente si avvicinano molto a quelli previsti in fase progettuale, considerato che il BER aumenta all'aumentare del baud rate e al crescere delle dimensioni del frame trasmesso. L'unico valore "anomalo" registrato riguarda il calcolo del BER per un bit rate pari a 1200 bps, infatti, in questo caso si osserva che ad un certo punto i bit non esattamente riconosciuti in ricezione diminuiscono invece di aumentare.

Nel complesso, comunque, il bit error rate ricavato risulta soddisfare i requisiti di una buona comunicazione in quanto si attesta su valori abbastanza bassi; addirittura, a 600 bps , il BER vale soltanto 4,2x 10^{-6}, ciò implica una bassa percentuale di bit non esattamente interpretati da parte dal modem. Pertanto è possibile concludere che i risultati sperimentali ottenuti sono soddisfacenti, fermo restando che sarà possibile apportare upgrades al fine di migliorare le prestazioni e gli indici di qualità del dispositivo.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte dalla Seconda Università di Napoli è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/058.

b. Gestione ottimale reti di edifici

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

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 oggetto del subtask b.1.

Validazione ed analisi dati edifici: analisi dei dati raccolti in fase operativa dai sistemi di monitoraggio installati sul cluster di edifici

L'attività è consistita nella continuazione del processo di verifica e collaudo del sistema di monitoraggio energetico e ambientale indoor implementato sul distretto di edifici situato presso il centro ENEA della Casaccia. Tali edifici (in totale 8 più la centrale termica del distretto), che presentano caratteristiche simili dal punto di vista dimensionale, impiantistico e costruttivo, hanno tutti destinazione d'uso ufficio e, dal 2011, sono oggetto di un progetto sperimentale di monitoraggio e diagnostica da remoto. Maggiori dettagli relativamente alla descrizione degli edifici e ai primi risultati ottenuti dalla sperimentazione sono riportati nei rapporti redatti nelle precedenti annualità [rapporti RdS/2012/229 e RdS/2013/121].

L'attività di validazione e analisi dei dati di monitoraggio, iniziata nel 2012, si è concentrata sulla verifica della qualità dei dati di natura energetica, ambientale e gestionale provenienti dalla sensoristica installata all'interno degli otto edifici componenti il cluster (e connessa centrale termica del distretto). L'analisi dei dati è stata effettuata su un periodo di campionamento di un anno (01 agosto 2013- 31 luglio 2014). Tutti i dati, tranne le presenze, sono stati acquisiti con un time step di 15 minuti. Per ogni sensore installato, si sono verificate: l'accuratezza della grandezza misurata, il periodo di campionamento, la frequenza temporale di acquisizione, il numero totale di record registrati durante il periodo di monitoraggio, la quantità di dati mancanti e l'attendibilità dei dati acquisiti. I dati raccolti dalla piattaforma di acquisizione sono stati estratti ed elaborati fuori linea. Per ogni edificio si sono analizzati i dati di energia termica, di energia elettrica, di temperatura interna, di occupazione e i parametri ambientali esterni, allo scopo di realizzare un unico database di riferimento per lo sviluppo di tutte le altre attività elencate a programma. L'approccio utilizzato per lo svolgimento di questa attività si basa essenzialmente sull'applicazione di tre fasi conseguenti:

1. Individuazione degli errori, effettuata attraverso la verifica delle situazioni di fuori dominio, delle mancate risposte e delle anomalie dei valori;
2. localizzazione degli errori che causano le anomalie;
3. correzione degli errori, la quale è stata di 2 tipi: eliminazione dei valori errati e integrazione di nuovi dati ottenuti attraverso metodi numerici di interpolazione lineare.

La verifica ha permesso di evidenziare che, a parte i dati di presenza di tutti gli edifici e le temperature interne dell'edificio F67, tutte le altre informazioni acquisite, sottoposte ad un opportuno processo di correzione, ove necessario, sono risultate attendibili ed elaborabili. Si conferma dunque con questa analisi la qualità del sistema di monitoraggio, che malgrado richieda ancora piccoli interventi di ottimizzazione già identificati, è migliorato grazie alle cicliche verifiche di qualità dei dati.

KPI rete di edifici: elaborazione e analisi dati energetici del monitoraggio in campo. Caratterizzazione dei profili di consumo e benchmarks

L'attività di elaborazione ed analisi dati si compone di più fasi che possono essere sintetizzate come di seguito.

Verifica dei bilanci energetici

Questa operazione si effettua a completamento della verifica della qualità dei dati ed è mirata a verificare la "robustezza" del sistema di monitoraggio. I dati misurati in ogni singolo edificio, sia termici che elettrici, vengono in questa fase aggregati e messi a confronto con i dati di monitoraggio ottenuti al punto di erogazione dell'energia (es. contatore generale per l'energia elettrica e contabilizzatore di calore in centrale termica per l'energia termica). I risultati di tale operazione hanno verificato l'accettabilità dei valori misurati, evidenziando come gli errori emersi dal calcolo dei bilanci energetici siano ridotti e ricadano nei ranges di accettabilità legati all'incertezza di misura.

Definizione e valutazione di nuovi Key Performance Indicators (KPI)

Questa fase prevede la determinazione e l'applicazione di nuovi KPI termici, insieme ai KPI elettrici, al nuovo campione di dati monitorati. Lo scopo è quello di validare i KPI già introdotti e di inserirne di nuovi al fine di poter confrontare gli edifici appartenenti al cluster sia dal punto dell'energia termica, sia dell'energia elettrica, sia

dell'energia totale (energia primaria). Gli indicatori energetici introdotti in questa attività sono espressi come rapporto tra il consumo di energia elettrica e termica in termini di:

- consumo totale
- consumo di energia per usi finali
- consumo di energia per fonti energetiche
- fattori di normalizzazione che ricadono all'interno delle categorie seguenti:
- caratteristiche geometriche (superfici e volumi)
- fattori legati all'uso dell'edificio (ove possibile utilizzare i dati di presenza)
- fattori climatici.

Caratterizzazione e clusterizzazione dei profili di consumo energetico

Questa operazione si concretizza nella determinazione di profili di consumo energetico per edifici per uffici con caratteristiche comuni a quelle del cluster. I profili tipici di potenza, sia elettrica che termica, sono determinati per i vari mesi dell'anno e riportano range di accettabilità che dovranno essere rispettati nel tempo. I profili sono costruiti sia per i giorni feriali che per i festivi, sia per i dati aggregati che, dove possibile, disaggregati. I risultati evidenziano chiare anomalie nella gestione dell'energia, che possono essere risolti attraverso interventi di gestione e manutenzione. Il confronto dei profili appartenenti a diversi edifici consente di identificare puntualmente, per ogni immobile, dove intervenire. Il monitoraggio energetico in continuo consentirà successivamente di verificare l'effetto positivo degli interventi e di valutare i risparmi energetici ed economici ottenuti. Lo stesso strumento avrà in un secondo momento lo scopo di valutare eventuali risparmi energetici ottenibili agendo sui sistemi di gestione tecnica degli impianti. Un esempio di utilizzo della profilatura energetica per valutare il risparmio dovuto ad interventi di gestione è illustrato in Figura 398, il primo profilo di potenza frigorifera illustra la variazione del controllo dell'impianto nel mese di luglio 2014 rispetto al mese di giugno 2014 per uni degli edifici del cluster (edificio F66). Le due immagini successive illustrano i profili medi di potenza frigorifera nei mesi di giugno e luglio e l'energia media giornaliera consumata, sia durante i giorni feriali che durante i giorni festivi. Dai profili di energia si può stimare il risparmio giornaliero ottenibile di energia frigorifera (circa 25 kWh nei giorni feriali e circa 150 kWh nei festivi) apportando modifiche al controllo degli impianti frigoriferi (in particolare nel caso specifico spegnendo l'impianto).

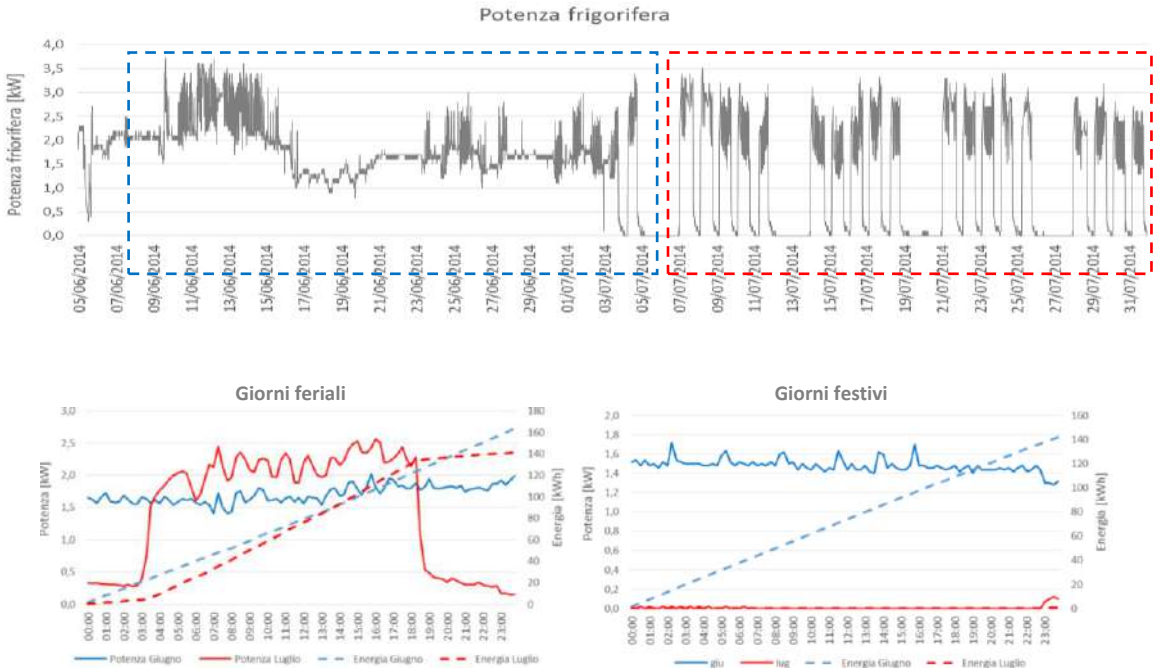


Figura 398. Profili giornalieri di potenza ed energia frigorifera. Edificio F66. Giugno-Luglio 2014

Elaborazione di dati ambientali in relazione ai consumi energetici

Malgrado all'interno dell'attività relativa ai "Metodi per l'analisi prestazionale di reti di edifici e test su dati sperimentali e simulatore" [rapporto RdS/2013/121] si fosse preferito non effettuare analisi di comfort termico, in

quanto i sensori di temperatura non erano stati installati all'interno di ambienti rappresentativi ma all'interno di corridoi, in questa fase si è deciso di utilizzare comunque tali informazioni disponibili per evidenziare il legame che sussiste tra parametri ambientali e consumi energetici. A tale scopo le elaborazioni vengono illustrate attraverso metodi di rappresentazione innovativi, che consentono la valutazione dell'edificio dal punto di vista del comfort e dei consumi energetici in diverse stagioni dell'anno.

Diagnostica su consumi di natura termica. Sviluppo di modelli di diagnostica avanzata attraverso i dati del monitoraggio in campo

L'obiettivo di questa attività è strettamente legato allo sviluppo di una metodologia per la gestione integrata e l'ottimizzazione del cluster di 8 edifici all'interno dello smart village sperimentale del C.R. ENEA Casaccia. Il fine è quello di supportare politiche di controllo della domanda di energia basate su una modellistica avanzata che tenga conto del comfort dell'utente evitando distacchi dalla rete e anomalie energetiche. Sulla base dell'elaborazione dei dati di monitoraggio del cluster di edifici (attività iniziata nelle annualità precedenti), la ricerca ha previsto lo sviluppo della procedura diagnostica concepita secondo la suddivisione logica dei sintomi e delle anomalie individuate ("pre-processing"), di eventi connessi all'anomalia ("situation assessment"), delle cause effettive, e le loro relazioni attraverso l'uso di alberi decisionali e in generale di metodi di data fusion. Le logiche di diagnostica sviluppate sono connesse all'utilizzo dell'energia termica sia per il riscaldamento che per il raffrescamento ambientale. Sono stati definiti sia opportuni fuzzy set che regole di aggregazione per la successiva implementazione sulla piattaforma ICT "Smart Village". Il risultato atteso è un sistema di rilevazione delle anomalie con l'individuazione della causa per la linea di condizionamento ambientale, analogo a quello dell'illuminazione, che le identifichi e le segnali in tempo quasi reale.

L'attività di ricerca ha previsto l'applicazione di metodi robusti per la caratterizzazione e stima degli usi finali di energia termica del cluster di 8 edifici e per lo sviluppo di tecniche innovative di FDD (Fault Detection and Diagnostic). Sono state implementate metodologie fondate sull'utilizzo sia di modelli inversi empirici sia di metodi statistici, seguendo un approccio del tipo top-down e quindi finalizzato a condurre analisi di rilevamento di anomalie sulla base di dati di monitoraggio relativi agli edifici nel loro insieme.

In particolare 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 riscaldamento e raffreddamento. Sono state sperimentate le potenzialità di un algoritmo di classificazione (CART), e di due tecniche di clustering (K-Means e DBSCAN). Con i metodi CART e K-Means il rilevamento dei valori anomali è stato condotto per ogni classe o cluster individuato, attraverso il metodo GESD (Generalized Estreme Studentized Deviate manyoutlier procedure). Il metodo DBSCAN, invece, ha consentito di individuare per via diretta i valori anomali attraverso lo stesso processo di clusterizzazione. A seguito dell'individuazione dei valori anomali per ogni classe individuata sono stati introdotti alcuni indici sintetici che hanno consentito di quantificare la severità della anomalie riscontrate.

Inoltre è stata condotta un'analisi dei consumi energetici di riscaldamento (periodo febbraio-marzo 2014) e raffreddamento (periodo giugno-luglio 2014) tramite tecniche di "neural ensembling" del tipo Basic Ensemble Method (BEM) per la rilevazione di comportamenti energetici anomali (fault detection). In particolare, il training delle reti neurali artificial (RNA) è stato eseguito su un dataset privo di fault in modo da condurre in seguito un'analisi di fault detection di testing basata sul valore dei residui tra valore di consumo stimato dal BEM e valore di consumo reale. Le variabili di input dell'ensemling neurale (id del giorno della settimana, id dell'ora del giorno, temperatura interna dell'edificio, temperatura esterna, radiazione solare e, nel caso del raffreddamento, umidità relativa esterna), tutte misurate al quarto d'ora, determinano la variabile dipendente di output, ossia il valore di potenza termica al quarto d'ora adoperata per il riscaldamento/raffrescamento di ogni edificio del cluster. Un fault coincide con la presenza di un picco nella serie temporale dei residui, la cui severità è quantificata da due indici: *peakfunction S* e *modified z score*. L'utilizzo dei residui permette di effettuare un'analisi multivariata: un valore di consumo viene considerato anomalo non necessariamente perché elevato ma in relazione alle condizioni in cui l'edificio opera in quell'istante. Nel caso in esame l'analisi dei residui ha permesso quindi di individuare valori di consumo effettivamente anomali, ma anche le conseguenze di cambiamenti di gestione e l'errata acquisizione dei valori di potenza termica. In relazione al riscaldamento, i fault di consumo individuati con questa metodologia sono principalmente collocati nella fascia mattutina e serale, e sono riconducibili ad un leggero abbassamento dei consumi termici nella seconda metà di marzo 2014 rispetto al mese precedente. In Figura 399 si illustra, a titolo d'esempio, il consumo reale dell'edificio F66 e quello leggermente maggiore stimato dal BEM neurale, con i relativi residui. Il valore molto elevato dei residui negli ultimi 2 giorni di marzo è dovuto ad un errore di acquisizione della potenza termica, che risulta essere pari a zero ma che, per quanto appreso dai modelli, dovrebbe invece essere molto più alta.

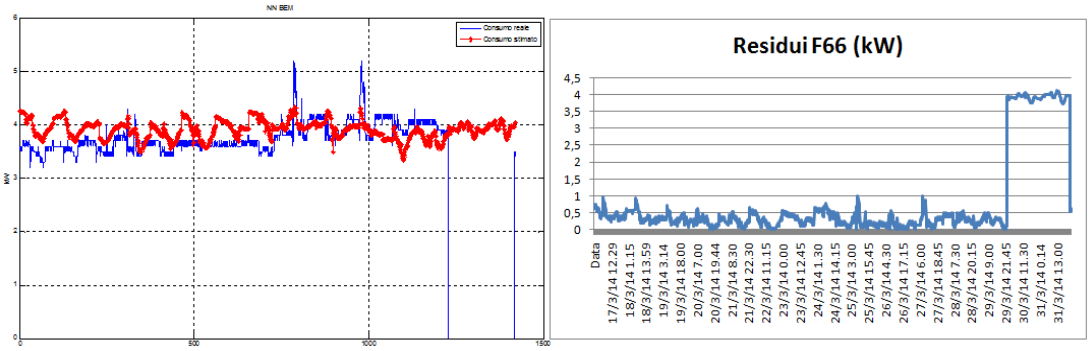


Figura 399. Potenza a termica reale (linea blu) e stimata (linea rossa) per il riscaldamento e residui dell'edificio F66 (marzo 2014)

Un esempio di fault effettivo individuato grazie all'analisi dei residui è illustrato in Figura 400. In questo caso infatti, nella giornata del 21 luglio, ad una temperatura esterna più bassa di circa 5 °C rispetto alla media del periodo (temperatura media di 22,9 °C nella giornata del 21/07), non corrisponde un abbassamento della potenza termica impiegata per il raffreddamento (alle 14.45 del 21/07 si impiega una potenza termica di 2,8 kW, pari a quella utilizzata nelle giornate più calde). L'attività di ricerca si è fondata inoltre su opportune analisi di comparazione e accoppiamento tra diversi metodi di FDD. Sulla base dei modelli sviluppati nel precedente contratto, sono state sperimentate tecniche di combinazione in cui i residui derivanti dall'ensembling delle reti neurali sono stati analizzati con tecniche di pattern recognition per l'individuazione di fault caratteristici a partire dalla loro classificazione.

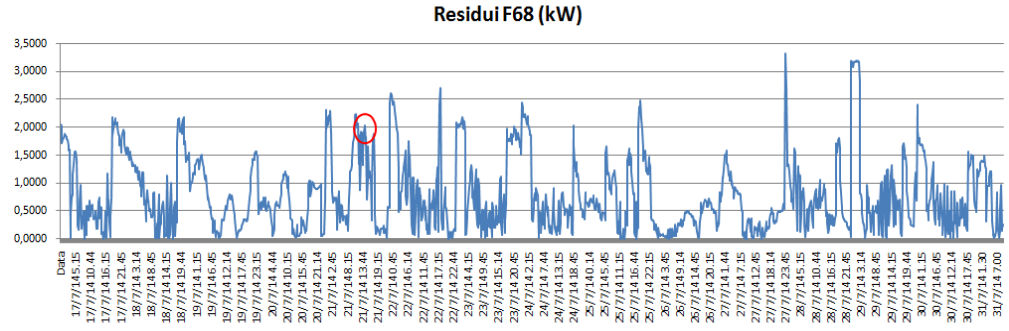


Figura 400. Residui relativi alla potenza termica per il raffreddamento dell'edificio F68 (luglio 2014)

A partire dalle analisi di fault detection sopra descritte, sono state implementate, attraverso opportuni fuzzy set, cinque diverse regole diagnostiche per risalire alle cause connesse alle anomalie riscontrate nell'ambito del riscaldamento/raffreddamento degli edifici. In particolare sono state analizzate le seguenti cause.

1. *Malfunzionamento del timer in centrale termica*: in questo caso la regola che si è introdotta è "Consumo termico alto (funzione di membership: sigmoide) al di fuori dell'orario di lavoro (funzione di membership: gaussiana)".
2. *Scorretta gestione della distribuzione del calore*: la regola introdotta è "Consumo termico alto (funzione di membership: sigmoide) in orario di lavoro (funzione di membership: gaussiana) e in assenza di occupazione (valore percentuale di occupazione di edificio)" oppure "Consumo termico basso in orario di lavoro e in presenza di occupazione" con identiche funzioni di membership.
3. *Scorretto funzionamento della valvola miscelatrice in centrale termica*: la regola introdotta è "La valvola non miscela (sulla base del valore percentuale di apertura rilevata) quando la differenza tra la temperatura di mandata e quella di set point è minore di un valore di benchmark" oppure "La valvola miscela (sulla base del valore percentuale di apertura rilevata) quando la differenza tra la temperatura di mandata e quella di set point è maggiore di un valore di benchmark".
4. *Staratura del termostato di stanza in periodo estivo*: la regola introdotta è "Una o più stanze di una zona termica presentano una temperatura interna maggiore del setpoint impostato".

5. *Anomalia impianto di raffrescamento*: la regola introdotta è "Tutte le stanze di una zona hanno una temperatura maggiore del setpoint impostato".

Una descrizione dettagliata dei risultati delle attività svolte dal Politecnico di Torino è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/061.

Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria

Nell'ambito della realizzazione del dimostrativo dello "Smart Village" nel Centro Ricerche ENEA Casaccia (subtask b.1) è stato realizzato un sistema di supervisione e attuazione di strategie di ottimizzazione, inoltre, sono state definite regole di diagnostica termica ed applicate all'edificio F40.

In particolare, le attività svolte sono un'evoluzione della piattaforma integrata realizzata nelle precedenti annualità. Le funzionalità principali introdotte riguardano l'interfacciamento trasparente con i sistemi di ottimizzazione (es. MATLAB) e la regolazione dei termostati delle stanze secondo profili prestabiliti dal processo di ottimizzazione, permettendo quindi una gestione più efficiente della temperatura interna. Tale approccio inoltre predispone per una futura applicazione della gestione attiva della domanda.

Le regole di diagnostica termica hanno riguardato l'identificazione di guasti relativi alla centrale termica, in particolare il timer, il sistema di controllo della centrale e la valvola di miscelazione del fluido di mandata. Tali regole sono state realizzate, come per la diagnostica elettrica, secondo la logica fuzzy.

Sistema di supervisione e controllo BEMS

L'applicativo di regolazione dei termostati dell'edificio F40 è inserito nel business intelligence layer della piattaforma integrata di data fusion, agisce sulla regolazione dei setpoint dei termostati di stanza dell'edificio e si interfaccia con il dataware layer per l'acquisizione dati. L'applicativo è stato realizzato in Java e comunica con il Building Energy Management System (BEMS) tramite RESTful WebServices (WS) come mostrato in Figura 401.

Il BEMS successivamente tramite PLC instrada i comandi di attuazione ai dispositivi situati in ogni stanza. L'applicativo è predisposto per l'attuazione di profili statici, secondo uno scheduling giornaliero, o dinamici, dipendenti da forzanti esterne come le condizioni meteorologiche e l'occupazione delle stanze.

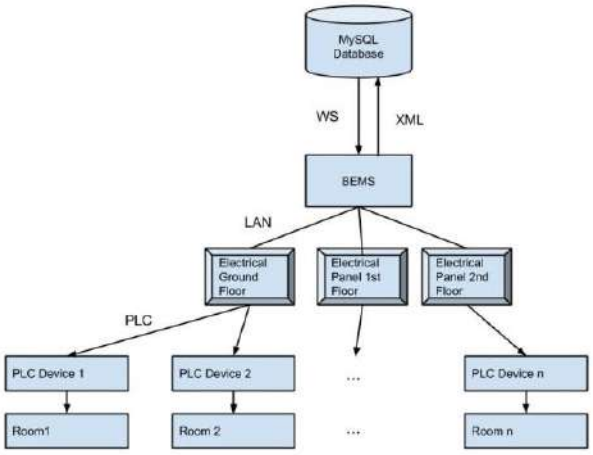


Figura 401. Schema del sistema di interfacciamento piattaforma-edificio F40

Diagnostica termica

L'attività relativa alla diagnostica termica è incentrata sull'applicazione di regole basate sulla logica fuzzy riguardanti la centrale termica. Tale attività è strettamente correlata alla diagnostica elettrica relativa all'annualità precedente e si basa nuovamente sul principio suddivisione della diagnostica nella fase di preprocessing, situazioni e cause. La data fusion è ottenuta secondo la già sperimentata logica fuzzy.

Le cause prese in esame sono:

- malfunzionamento timer in centrale termica invernale
- malfunzionamento sistema di controllo centrale termica
- malfunzionamento valvola di miscelazione del fluido di mandata in centrale termica
- staratura del termostato di stanza
- malfunzionamento del sistema di climatizzazione.

Nella successiva annualità le regole di diagnostica termica definite secondo la logica fuzzy saranno implementate sulla piattaforma "Smart Village" e saranno sperimentate sugli edifici pilota.

Una descrizione dettagliata di questa attività è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/062.

Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

L'attività, inquadrata nel subtask b.2 ha avuto per oggetto il miglioramento di alcune funzionalità del simulatore termico ed integrazione di un modello per la simulazione dei carichi elettrici.

Modello della centrale termica

Il modello della centrale termica include sia il modello del generatore di calore che quello del gruppo frigorifero. Rispetto al PAR 2012 il rendimento della caldaia (eta) ed il COP del gruppo frigorifero (eer) sono variabili di uscita del modello mentre in precedenza erano parametri di ingresso considerati in prima approssimazione costanti e pari al rendimento medio stagionale. Ora questi parametri sono stati modellati con maggiore accuratezza e sono variabili, per ogni time-step di calcolo, in funzione sia del fattore di carico degli impianti che delle condizioni ambientali esterne, qualora fossero influenti (come nel caso del gruppo frigo).

Modello dei consumi elettrici per l'illuminazione e per i fan-coils

La modellazione dei consumi elettrici dovuti all'illuminazione è partita dal lavoro sviluppato durante il PAR 2011, ulteriormente perfezionato prevedendo un sistema di controllo con dimmerizzazione. Nell'attuale simulatore è stato inserito il modello "white box" sviluppato allora che, in funzione delle presenze, individua le stanze potenzialmente attive e associa loro un consumo individuato grazie alla fase di audit sui corpi illuminanti. Oltre al controllo ON-OFF dell'illuminazione è stato anche inserito un blocco di controllo "dimmerizzazione" per modulare la potenza delle lampade in un range definibile dall'utente e per ora impostato tra il 20 ed il 100% della potenza. Il modello dei consumi elettrici dei terminali termici è stato inserito all'interno del blocco di simulazione dei fan-coils che quindi, rispetto alla versione sviluppata nel PAR 2012, ha una uscita in più.

Assessment del simulatore a partire dai dati sperimentali

A seguito dell'attività di monitoraggio iniziata nel PAR precedente, con l'aumentare della disponibilità dei dati è stato possibile arrivare ad una definizione dei parametri di ingresso al simulatore soddisfacenti e con margini di errori decisamente accettabili. E' importante, comunque, sottolineare come la procedura di assessment del simulatore sia avvenuta principalmente in maniera euristica che potrebbe essere ulteriormente perfezionata. I principali parametri su cui si è intervenuto per un "tuning" fine del modello sono stati: gli apporti gratuiti, il set-point di temperatura ambiente ed infine alcune minime modifiche all'involucro edilizio.

Il risultato della simulazione è il frutto dell'effetto combinato di questi fattori ovviamente con pesi diversi: gli apporti gratuiti legati alle presenze agiscono più sul carico termico dinamico mentre le modifiche all'involucro edilizio agiscono maggiormente sull'inerzia termica dell'edificio. La struttura dell'involucro è abbastanza definita una volta noto il progetto della struttura, quindi la calibrazione può essere fatta andando a modificare solo leggermente superfici e spessori. Al contrario il valore degli apporti gratuiti (funzione del profilo di presenza orario negli edifici) sono stati fissati in maniera "arbitraria" dall'utente all'interno del margine di manovra fornito dai range disponibili in bibliografia per ciascuna componente: calore sensibile dell'occupante; produzione di umidità da parte dell'occupante; apporto postazione PC.

Per quanto riguarda i set-point della temperatura ambiente, è importante sottolineare che gli edifici sono modellati per zone termicamente omogenee e che il blocco di simulazione del termostato è programmato per mantenere la temperatura di set-point di queste macrozone. Come conseguenza si ha che il termostato di ciascuna macrozona è programmato per mantenerla in temperatura senza considerare che al suo interno ci possano essere uffici potenzialmente vuoti. Volendo chiarire con un esempio: poiché nel modello dell'edificio F40 ci sono 12 macrozone scaldate, impostando la temperatura di set-point di ciascuna zona a 21°C, il simulatore del termostato tenderà a mantenere la temperatura di set-point in tutte le macrozone sia che nell'edificio ci siano 12 o 20 o 44 stanze attive. Questa ipotesi semplificativa riduce di molto il tempo di modellazione dell'edificio, il tempo ed il peso del calcolo della simulazione ma introduce un potenziale fattore di scostamento tra dati reali e dati simulati.

I grafici in Figura 402 mostrano il confronto tra l'andamento dell'energia termica simulato e misurato sia nel caso in cui non vengano simulati gli apporti gratuiti (a) sia in quello in cui questi vengano simulati (b). Il confronto tra le due figure dimostra qualitativamente come il fatto di considerare gli apporti gratuiti legati al profilo di presenza migliori il risultato della simulazione.

Figura 403 vengono riportati i grafici di confronto tra energia termica reale e simulata su base oraria, bioraria e giornaliera. Come si può vedere, più è piccolo l'intervallo che s'intende simulare maggiore è lo scostamento dei risultati della simulazione dal dato reale; questo è ovvio vista la quantità dei parametri in gioco (meteo, profili di presenza, comportamento degli occupanti, funzionamento degli impianti e dei terminali termici).

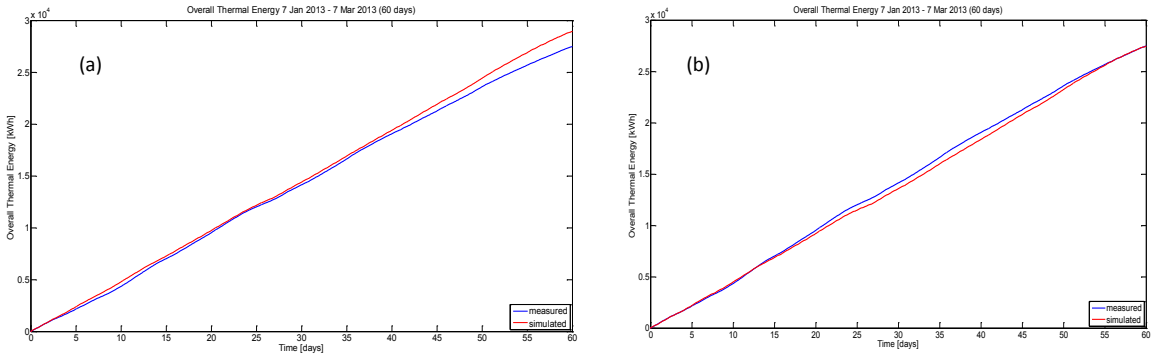


Figura 402. Confronto tra l'andamento dell'energia termica simulato e misurato sia nel caso in cui non vengano simulati gli apporti gratuiti (a) sia in quello in cui questi vengano simulati (b)

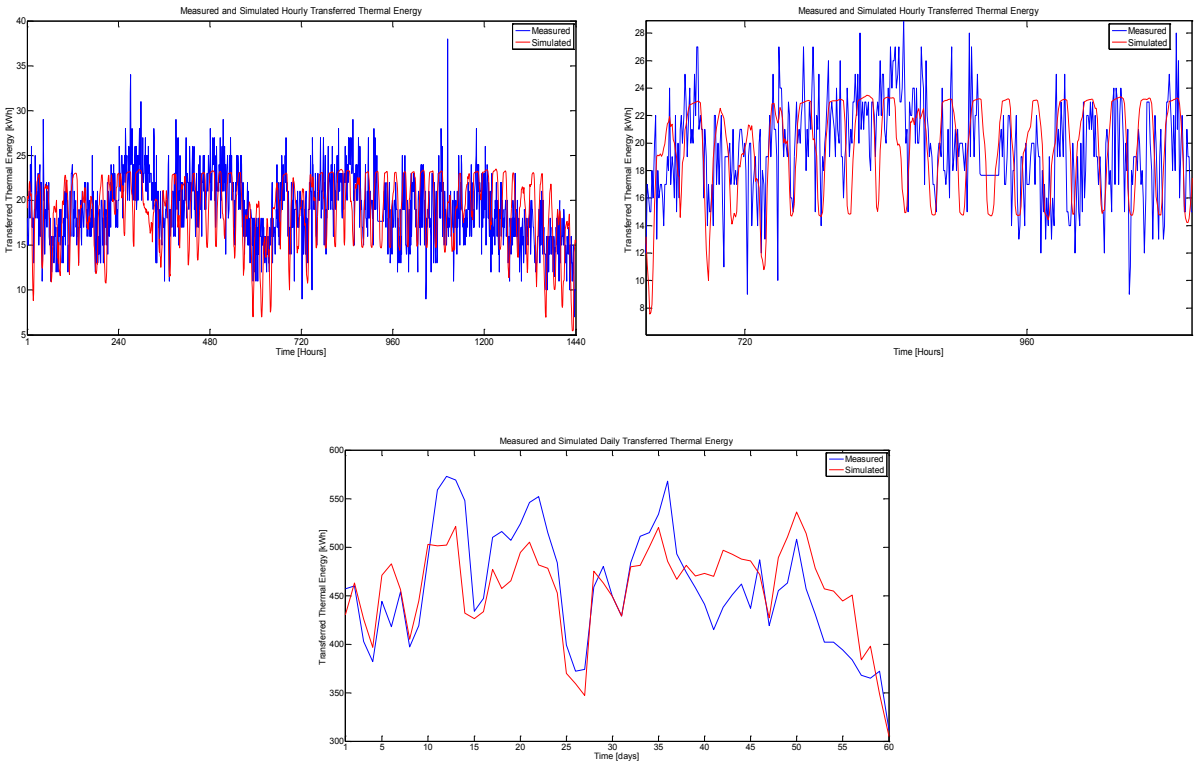


Figura 403. Confronto tra energia termica reale e simulata su base oraria, bioraria e giornaliera

Analisi degli errori sul calcolo dell'energia termica

Le considerazioni qualitative fatte in precedenza, trovano riscontro quantitativo andando a quantificare gli errori dei risultati della simulazione rispetto ai dati reali. In particolare dalla Tabella 110 emerge come il fatto di considerare gli apporti gratuiti legati al profilo di presenza migliori i risultati della simulazione. Considerando il caso con gli apporti gratuiti, l'errore medio percentuale assoluto giornaliero si attesta intorno al 7%; più alto (18%) nel caso di l'errore medio percentuale assoluto. L'analisi dell'errore relativo dimostra ulteriormente la bontà del processo di tuning del simulatore. L'errore relativo calcola lo scostamento tra valore simulato e reale in percentuale rispetto al valore reale. Togliendo le prime ore di transitorio iniziale della simulazione, l'errore relativo massimo è inferiore al 5%.

In conclusione, il tuning del simulatore su dati reali può essere definito soddisfacente. Tuttavia questo è soltanto un primo importante passo; il processo di tuning dovrà continuare da oggi in avanti attraverso un monitoraggio continuo rispetto ai dati acquisiti. I prossimi step potranno essere il test della prossima stagione invernale e quelli

sulla stagione estiva appena trascorsa, appena saranno disponibili tutti i dati necessari per il funzionamento del simulatore.

Una descrizione dettagliata dei risultati dell'attività è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/063.

Tabella 110. Errori sul calcolo dell'energia termica

	Senza apporti gratuiti	Con apporti gratuiti
Errore medio percentuale assoluto giornaliero	9,36 %	7,06 %
Errore medio percentuale assoluto biorario	18,68 %	16,22 %
Errore medio percentuale assoluto orario	17,93 %	18,30 %
Errore assoluto massimo	1473 kWh	741,51 kWh
Errore assoluto medio	461 kWh	327,14 kWh
Erroreassoluto minimo	0 kWh	0 kWh
Errore relativo massimo	28,5 %	28,5 %
Errore relativo massimo (senza transitorio iniziale)	11,5 %	4,6 %
Errore relativo medio (senza transitorio iniziale)	3,9 %	2,6 %
Errore relativo minimo (senza transitorio iniziale)	0,9 %	7,1 %

Consiglio Italiano per le Scienze Sociali (CSS)

L'ENEA sta svolgendo un'attività di coordinamento su un sotto programma denominato Urban Energy Networks, nel contesto del Joint Programme EERA on Smart Cities (JPSC), all'interno del quale è stata fatta ampia opera di diffusione dei risultati ottenuti nel presente obiettivo. Il programma prevede lo sviluppo di strumenti e metodologie scientifiche che facilitino e stimolino piani d'intervento, progetti e attività intelligenti del "sistema energia" in ambiti urbani.

Al fine di raccogliere ed elaborare il maggior numero possibile di progetti realizzati fino ad oggi in tutti gli stati partecipanti alla JPSC, è stata sviluppata l'idea di creare una piattaforma di tipo aperto per la registrazione di informazioni utili allo scopo.

La fase di analisi delle k-word da utilizzare nella piattaforma e a cui attribuire valore in un'ottica di definizione di indicatori e descrittori dei progetti di ricerca è stata effettuata nell'anno precedente. Attraverso questa analisi è stata messa a punto la mappa concettuale del framework. La fase successiva comporta la definizione del modello dati che permetterà la raccolta delle informazioni citate e fornirà la base dati per le sviluppo di profili di interrogazione standardizzati.

Si tratta di una piattaforma interdisciplinare e multidimensionale in grado di raccogliere ed elaborare il maggior numero possibile di progetti realizzati fino ad oggi in tutti gli stati membri partecipanti alla JPSC.

Per arrivare a questo obiettivo è necessario avviare un'attività di screening sui principali elementi che caratterizzano possibili dinamiche urbane concentrandosi sulle definizioni internazionali di Social Innovation, (Creative Economic Capital, Infrastructural, Logistic, Connectivity and Communication Capital, Social and Cultural Capital, Environmental Capital) e definendo i target delle politiche di riferimento, i driver di trasformazione e le tecnologie abilitanti.

Tale attività, inserita nel subtask b.3, svolta nell'ambito della collaborazione con la società Centro Studi Sociali, ha avuto per oggetto la definizione dei contenuti per modulare una piattaforma interdisciplinare e multidimensionale in grado di indagare la relazione energia/social innovation nell'ottica di identificare settori, aree, e target per cui i progetti di ricerca Smart Cities risultano potenzialmente più impattanti nell'ottica di '*societing*' (ovvero fare società insieme).

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/154.

c. Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Scienze Chimiche

Nell'ambito della ricerca sui diodi organici ad emissione di luce (OLED), l'attenzione si sta via via focalizzando sul design di nuove molecole organiche da utilizzare come strato attivo elettroluminescente in grado di dare dispositivi con caratteristiche sempre migliori in termini di efficienza e intensità della radiazione emessa.

Recentemente particolare attenzione è stata rivolta ai triazatruxeni (TAT) non solo per la loro elevata mobilità di carica (fino a μ = 1,4 $cm^2V^{-1}s^{-1}$) e per la loro tendenza a dare processi redox reversibili, a formare film sottili stabili e ad aggregarsi formando cristalli liquidi discotici elettroattivi, ma soprattutto per il loro impiego quale building-block planare per la sintesi di strutture oligomeriche ad elevata simmetria di tipo "star-shaped" di potenziale interesse per la realizzazione di OLED, celle solari, OFET, batterie e condensatori, e sensori.

I risultati degli esperimenti condotti nel precedente accordo tra ENEA e il Dipartimento di Scienze Chimiche avevano messo in evidenza delle significative differenze nelle proprietà optoelettroniche del TAT 1a a simmetria C_3 rispetto all'isomero asimmetrico 1b (Figura 404).

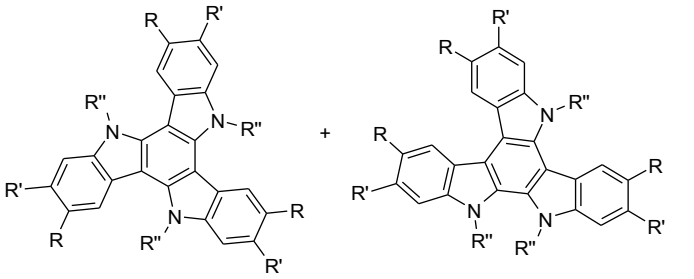


Figura 404. TATs precedentemente sintetizzati e studiati

Esperimenti condotti su diverse tipologie di dispositivi OLED realizzati con 1b quale strato attivo elettroluminescente avevano mostrato un buon funzionamento del dispositivo anche se con prestazioni non molto elevate. Gli stessi dispositivi realizzati con il TAT 1a non avevano funzionato, confermando le diverse proprietà esibite dai due isomeri.

Nonostante la bassa efficienza dei dispositivi OLED ottenuti con 1b, l'interesse verso i TATs asimmetrici rimane ugualmente molto elevato se si considera che dispositivi realizzati coniugando TATs simmetrici, quindi non elettroluminescenti, con polifluoreni o policarbazoli avevano fornito delle prestazioni eccellenti.

Sulla base di tali osservazioni, quindi, il lavoro sperimentale relativo alla presente annualità è stato basato sullo studio dell'effetto dei sostituenti sulle proprietà optoelettroniche dei triazatruxeni. A tale scopo sono stati sintetizzati TATs simmetrici e asimmetrici variamente sostituiti, ne sono state studiate le proprietà optoelettroniche (spettroscopia UV-vis e di fluorescenza, il comportamento termico (TGA) e la tendenza ad auto-aggregarsi in soluzione (spettroscopia NMR) e sono stati caratterizzati i dispositivi OLED realizzati con tali materiali organici.

In particolare, sono stati sintetizzati e caratterizzati spettroscopicamente (NMR, LDI-MS) i TATs simmetrici 2a-4a e asimmetrici 2b-4b mostrati in Figura 405.

Dagli spettri UV-Vis e di fluorescenza, registrati sia in soluzione sia come film, è stato possibile osservare che:

a) le bande sia di assorbimento sia di emissione nei TATs asimmetrici sono spostate nel rosso rispetto ai corrispondenti TATs simmetrici;
b) le rese quantiche di fluorescenza dei TATs asimmetrici risultano molto più intense;
c) l'E_g^{opt} (energy gap ottico) nei TATs asimmetrici è più basso rispetto ai TATs simmetrici;
d) gli spettri UV-vis dei film di TATs mostrano uno shift batocromico dei massimi di assorbimento insieme alla comparsa di code nel rosso che suggeriscono la formazione di aggregati supramolecolari.

Dall'analisi della variazione dei chemical shift delle risonanze ^{1}H NMR dei protoni aromatici e dei protoni sui gruppi NH con la concentrazione è stato possibile riscontrare la formazione di aggregati anche in soluzione per il TAT simmetrico 1a e per il TAT asimmetrico 4b.

Dall'analisi termo gravimetrica è emersa una buona stabilità termica dei TATs. Una descrizione delle attività svolte e dei risultati ottenuti è contenuta nel RdS/PAR2013/064

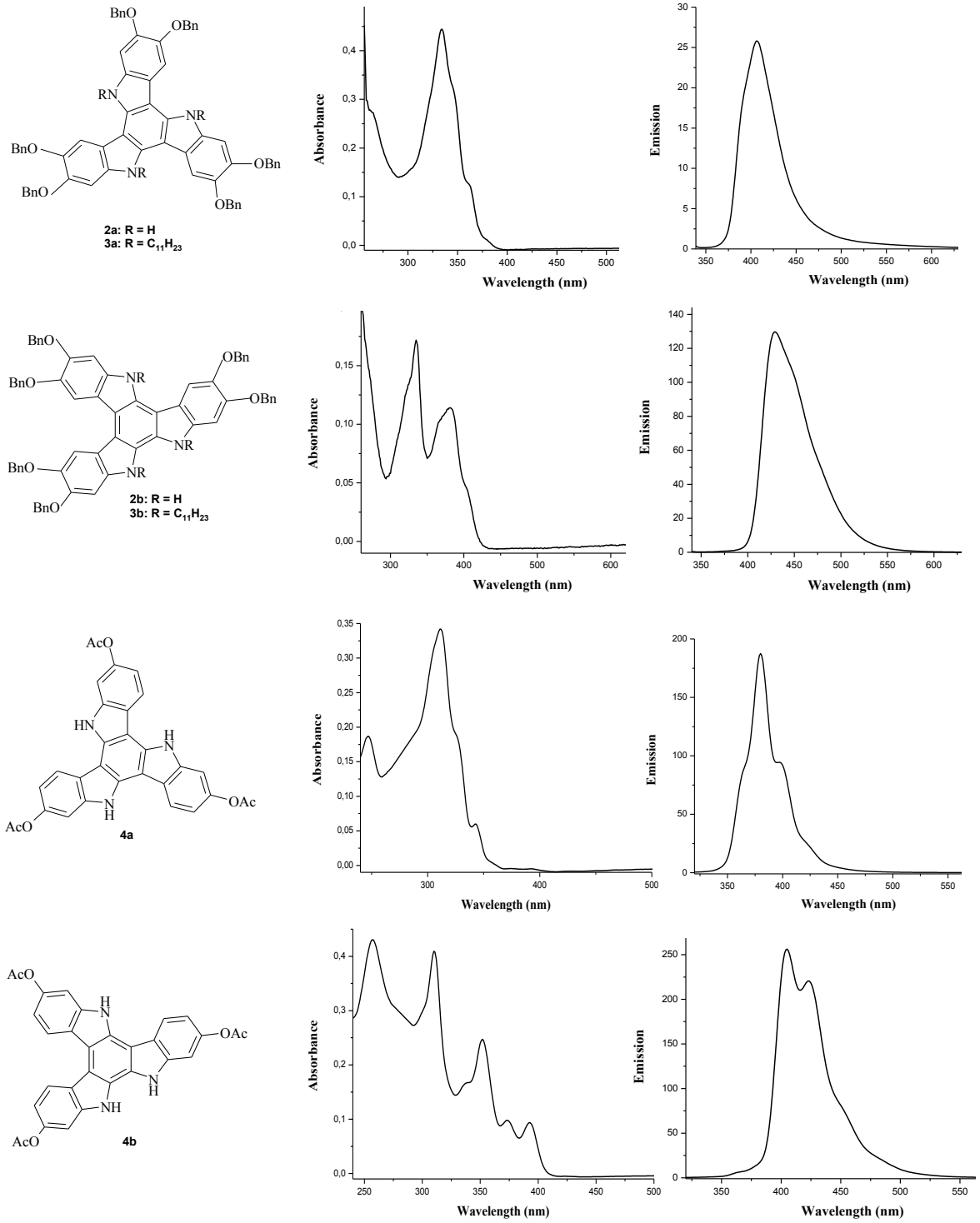


Figura 405. TATs simmetrici e asimmetrici sintetizzati e i loro spettri UV-vis e di fluorescenza in THF

Politecnico di Milano, Dipartimento DESIGN

Definizione dei requisiti per un sistema di illuminazione per ambienti industriali, in termini di performance luminosa

L'illuminazione industriale è un settore di ricerca non molto dinamico, non tanto per mancanza di importanza rispetto ad altri ambienti di lavoro (uffici), ma per la difficoltà a generalizzare ogni conclusione: la natura delle attività svolte in un ufficio sono molto simili rispetto alla generalità di questi ambienti, dove i compiti visivi possono essere molto diversificati, e le conclusioni di studi condotti in un particolare contesto sono facilmente estendibili anche in altri.

Lo scopo dell'illuminazione in ambienti industriali è quello di assicurare il soddisfacimento dei seguenti requisiti: 1) massima sicurezza, al fine di ridurre gli incidenti e la loro gravità; 2) buona visibilità del compito visivo, al fine di agevolare e semplificare l'attività lavorativa: questo aspetto è particolarmente importante nei casi in cui vi sia un impegno prolungato e che richiede elevata attenzione dell'utente; 3) adeguato confort dell'ambiente lavorativo a cui anche l'illuminazione concorre a determinare; 4) risparmio energetico, sia dal punto di vista dei consumi, sia da quello del risparmio delle attività di manutenzione.

Nello sviluppo di un nuovi impianto devono essere considerati dei parametri da tenere in considerazione, sia dal punto di vista dei requisiti, sia dal punto di vista teorico, sia dal punto di vista dell'offerta tecnologica di mercato; nell'attività svolta sono stati analizzati i valori di riferimento e indicazioni utili per la realizzazione di un buon impianto.

Sviluppo sistema ottico per il motore luminoso HUMBLEBEE sviluppato da ENEA

E' stata fatta un'analisi del sistema HumbleBee di ENEA. Mediante software di simulazione illuminotecnica si è confermato il rispetto dei requisiti di illuminamento e della sua uniformità. Tuttavia, data la particolare distribuzione fotometrica e l'altezza di montaggio, si presume che qualche problema dovrebbe nascere per quanto riguarda la limitazione dell'abbagliamento (valutabile con l'indice UGR). UGR dovrebbe oscillare tra 19 e 25, ma per l'installazione considerata e la distribuzione fotometrica dell'apparecchio, i valori ottenuti sono maggiori di 30.

Per risolvere il problema occorre agire su due parametri contemporaneamente: dimensione dell'area luminosa dell'apparecchio, per ridurre il valore della luminanza nella direzione di osservazione; distribuzione fotometrica dell'apparecchio, da modificare in modo da creare un angolo di schermatura (cut-off) nella distribuzione delle intensità luminose.

La soluzione proposta è un compromesso tra diverse esigenze: preservare il valore medio di illuminamento sui piani utili e la sua uniformità; limitare l'abbagliamento quantificato mediante l'indice UGR; prevedere un numero limitato di componenti aggiuntivi; la soluzione proposta dovrà essere inoltre semplice e di facile realizzazione, senza prevedere alcuna modifica di tipo meccanico o fotometrico agli apparecchi esistenti, ed economica.

E' stata definita la distribuzione fotometrica adatta a soddisfare i tutti i requisiti richiesti (incluso un indice UGR uguale o inferiore a 19): il miglior compromesso è stato identificato nella realizzazione di un riflettore in alluminio e di uno schermo di chiusura piano per ottenere il grado di protezione contro l'ingresso di polveri desiderato, a simmetria roto-simmetrica.

La distribuzione fotometrica è stata ottenuta tramite un sistema di ottimizzazione vincolata. Si è tenuto in considerazione anche l'effetto dello schermo di chiusura dell'ottica (previsto in materiale plastico PC di 3 mm di spessore) e con un profilo piano in modo da rendere molto semplice ed economica la sua realizzazione. Il riflettore dovrà essere realizzato in alluminio placcato (ALMECO-SACALL mod. 106), le cui caratteristiche di riflessione sono state inserite all'interno del programma di simulazione attraverso la creazione di un appropriato modello di BRDF (ABg scatter model). L'apparecchio con riflettore assume proporzioni molto simili rispetto a quelle di un prodotto equipaggiato con lampada a scarica. Il rendimento del sistema ottico secondario risulta pari a circa 81% (vicino al valore teorico per questa fotometria, 85%). L'efficienza del sistema complessivo è di circa 90 lm/W.

Studio delle problematiche dell'interfaccia di controllo del sistema al fine di ottenere un sistema efficace ed intuitivo, anche per personale non-esperto

E' stata inoltre redatta un'overview sull'illuminazione LED ed i suoi sviluppi futuri. La "luce LED" è vista come piattaforma cognitiva, sensibile, intelligente: il ruolo dell'utente deve rimanere centrale nel progetto.

Sono state analizzate le tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione e proposte analisi di diverse soluzioni in base alla "usabilità" e in particolare sull'Elemental Resource Model. In base ai casi studio analizzati, esistono diverse categorie di interfaccia per il controllo dell'illuminazione (ad es. Graphical User Interface o GUI con un controllo grafico, Surface User Interface o SUI con un controllo mediato attraverso touch-screen e display, Tangible User Interface o TUI con un controllo fisico, Interazione Spaziale con un controllo gestuale nello spazio circostante, ecc.)

Sono state analizzate le tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione, ad es. il controllo passivo e controllo attivo, la tipologia di interazione: manipolazione e gestualità, gli scenari di interazione con l'illuminazione di un contesto industriale, il controllo ibrido del sistema di illuminazione industriale (ovvero sia automatizzato con completo controllo da parte del sistema stesso basato su sensori di tipo contestuale e allo stesso tempo con la completa possibilità, da parte dell'utente, di interagire con l'illuminazione quando ne ha necessità.

Esperienza di controllo del sistema d'illuminazione completo applicato ad HumbleBee

Oltre all'illuminazione generale nel laboratorio ENEA, si è ipotizzata la necessità di installare degli apparecchi di illuminazione localizzata, sia per aumentare le prestazioni visive nelle zone in cui i compiti visivi sono più complessi, sia per dare la possibilità di personalizzare la performance luminosa ottenendo allo stesso tempo un'elevata efficienza energetica.

La struttura del sistema di illuminazione (generale e localizzata) comprende l'integrazione in un network Smart di controllo (wireless), e sono possibili modalità ibrida, automatica e manuale (mediante un'interfaccia SUI e TUI). Sono state presentate proposte per soluzioni (con interfacce di tipo TUI e SUI) per l'illuminazione localizzata. Sono quindi proposte diverse interfacce grafiche per una corretta, ergonomica e semplificata interazione tra utente e sistema. Sono anche descritte funzioni innovative che potrebbero essere implementate su HumbleBee, come ad esempio (nel report completo sono descritti anche altri scenari) l'automatizzazione della personalizzazione dell'illuminazione mediante riconoscimento diretto del lavoratore che, entrando in servizio viene monitorato tramite il suo badge identificativo che raccoglie sia le informazioni relative al "dove si trova" e "quale attività stia facendo", le sue preferenze in modo da personalizzare l'illuminazione localizzata nel rispetto di altri potenziali utenti che utilizzino lo spazio contemporaneamente.

Proposta del concept di un sistema di illuminazione che integri le funzioni di illuminazione generale e quella di illuminazione localizzata per una postazione di lavoro tipo

Il rapporto tra l'uomo, la macchina intesa come strumento del lavoro, l'ambiente e l'illuminazione è molto importante: solo mediante la corretta progettazione di questi tre elementi si definisce un luogo lavorativo confortevole, sicuro, efficace ed efficiente in cui siano limitati gli errori dell'individuo e comunque si possa agire in massima sicurezza per il compimento delle operazioni di lavoro. Sono stati quindi analizzati: il lavoro di tipo industriale: l'uomo, l'ambiente, la luce; le attività di lavoro: relazione uomo-macchina l'importanza dell'ambiente di lavoro: affordances[25]; progetto dell'illuminazione negli spazi industriali, con una overview generale; tipologie di illuminazione.

Il progetto L@W: LIGHT AT WORK

Viene fatta una proposta concreta per un sistema di illuminazione localizzata, applicabile anche al laboratorio ENEA, denominato L@W (Light at Work).

Gli obiettivi del sistema di illuminazione localizzata sono: 1) creare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiologiche dell'individuo, assicurando, quando possibile, un contributo di illuminazione naturale; 2) ottimizzare la percezione delle informazioni visive, con lo scopo di assicurare ai lavoratori le migliori condizioni di lavoro possibile. Nel corso delle attività sono stati analizzati i Requisiti del sistema di illuminazione localizzato, la performance visiva e temperatura di colore. E' stato analizzato e descritto lo stato dell'arte sull'illuminazione localizzata per il lavoro (Figura 406), esaminando i prodotti in commercio per illuminazione portatile e fissa.

Il sistema di illuminazione localizzata (motore L@W) è stato pensato per svolgere le seguenti funzioni di performance luminosa: 1) quantità e qualità 2) controllo automatico e controllo manuale 3) motore luminoso e sistema.

Per consentire la massima flessibilità di utilizzo nei diversi impieghi e campi nel settore lavorativo industriale e nelle diverse configurazioni, il motore luminoso è stato sviluppato come un elemento interfacciabile a diversi supporti e quindi declinabile sotto forma di sistema. In termini di usabilità generale, attenzione è stata posta sulla sicurezza elettrica, sicurezza rispetto agli urti, sicurezza termica.

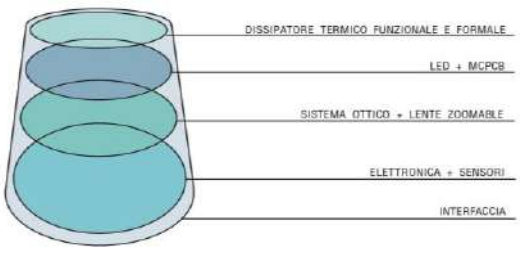


Figura 406. Layer funzionali del motore luminoso per l'illuminazione localizzata del settore industriale

E' stata svolta una ricerca sullo stato dell'arte tecnologico, includendo sistemi ottici, lenti a fuoco variabile per illuminazione allo stato solido, array di LED vs modulo/COB, diffusori olografici.

Lo studio del motore luminoso si è concentrato sul sistema di illuminazione a zoom variabile costituito da LED array Luxeon S, lente Carclo (oppure riflettore Venla e diffusore olografico a 10° che aumenta di poco le

[25] Termine per definire la qualità fisica di un oggetto che suggerisce a un essere umano le azioni appropriate per manipolarlo. Più alta è l'*affordance*, più sarà automatico ed intuitivo l'utilizzo di un dispositivo o di uno strumento

dimensioni del prodotto) e la lente Optotune la cui forma può essere modificata mediante il relativo holder che, attraverso una rotazione manuale consente di modificare l'apertura del fascio. Per quanto riguarda l'interessante soluzione a temperatura di colore variabile e distribuzione di luce variabile studiata attraverso il sistema LED ibrido Tridonic, riflettore Angela e diaframma mobile con diffusore olografico a 80°, ci si è soffermati sull'assessment tecnologico del sistema in esame attraverso un prototipo di studio intermedio senza approfondire, al momento, un design specifico sullo stesso: infatti, le dimensioni del sistema ottico per una soluzione a temperatura di colore variabile e distribuzione del fascio variabile studiato risultano troppo elevate per poter assicurare il progetto di un elemento di illuminazione da lavoro maneggevole e proporzionato.

La soluzione con zoom variabile selezionata è stata dunque elaborata attraverso tre proposte di motori luminosi con design differente. In particolare nelle diverse proposte sono stati approfonditi concept alternativi focalizzati su:

- rendimento ottico del sistema di illuminazione, limitando al massimo le inefficienze interne, mascherando il fascio al fine che risulti definito sul piano di lavoro e che limiti l'abbagliamento da visione diretta dell'ottica;
- dissipazione termica per garantire il corretto funzionamento del LED a regime;
- sicurezza termica per garantire la maneggevolezza del motore luminoso senza scottature da parte dell'utente;
- interfaccia del sistema sia in termini di ergonomia fisica e cognitiva attraverso la definizione di opportune manopole e mapping di comunicazione dei controlli a bordo del motore luminoso.

Inoltre la progettazione si è concentrata sulle modalità produttive per la realizzazione del prototipo di studio secondo diverse direttive: prototipazione dell'oggetto attraverso la semplificazione delle operazioni di costruzione, prototipazione dell'oggetto attraverso le moderne tecniche di prototipazione rapida.

Sono state elaborate diverse proposte, e si è proceduto nelle fasi successive con una di esse, derivante dalla semplificazione del processo costruttivo del prototipo di studio per realizzare un modello funzionante dal punto di vista ottico e termico ma anche esteticamente valido e utilizzabile per esperienze con gli utenti. Questa proposta formale e funzionale è stata progettata nel dettaglio e costruita ottenendo un prototipo di studio preliminare per le successive fasi di progetto. Il prototipo completato è stato misurato con prove di funzionamento di tipo ergonomico, ottico e termico, e altri.

Sono stati anche realizzati una serie di prototipi presso il Laboratorio Luce, propedeutici alla fase di design vero e proprio. Per realizzare un motore luminoso per task lighting industriale con caratteristiche di maneggevolezza, variazione della distribuzione luminosa ed eventualmente della temperatura di colore. Lo studio è stato sviluppato intorno a quattro diverse soluzioni tecnologiche di partenza individuate nella fase di stato dell'arte. In particolare: 1) LED array + Lente Carclo + Lente Optotune, 2) LED COB + Lente di Fresnel Khatod, 3) LED Array + Riflettore Venla + Diffusore Olografico (10°) + Lente Optotune, 4) Modulo LED ibrido Tridonic Talex + Riflettore Angela + Diffusore olografico 80°.



Figura 407. Sezione del motore luminoso e prototipo assemblato

La fase di misura vera e propria è stata utile alla caratterizzazione e al controllo ottico delle diverse soluzioni, evidenziando problemi e criticità nelle fasi preliminari di elaborazione del design, sia funzionali alla comparazione di vantaggi e svantaggi delle diverse soluzioni per selezionare quella più indicata per lo sviluppo di un prototipo

avanzato. Alcune proposte di concept sono state approfondite mediante un design specifico di soluzioni alternative, se ne è definita la geometria e la simulazione termica ha verificato il funzionamento termico. In Figura 408 il rendering di una delle soluzioni approfondite, che massimizza la dissipazione termica per garantire la sicurezza termica a contatto con le mani del lavoratore che utilizza il motore luminoso in situazioni di lavoro.
Una descrizione dettagliata dei risultati dell'attività è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/065.



Figura 408. Dettagli del sistema di interfaccia di una delle soluzioni proposte

Università di Milano, Dipartimento di Informatica

La presente collaborazione riguarda lo studio dei fattori del contesto che influenzano la resa cromatica delle sorgenti di luce e si inquadra nel subtask c.2.

La principale difficoltà della valutazione dell'indice di resa cromatica è il suo tentativo di misurare l'apparenza del colore più che il colore stesso e come noto l'apparenza dipende non solo dall'illuminante ma anche dal contesto in cui il colore è osservato. Lo studio degli stimoli all'interno di un contesto è un approccio piuttosto recente rispetto alla storia della colorimetria. Wyszecki fa la distinzione tra colorimetria di base e avanzata. La colorimetria di base fornisce una misurazione dei colori osservati in condizioni di visualizzazione isolate (*aperture mode*). Tuttavia, nella vita di ogni giorno, i colori sono visti in scene complesse e in condizioni di illuminazione disparate. Pertanto, nasce la necessità di una colorimetria avanzata, in grado di specificare le caratteristiche di un colore osservato in un ambiente complesso. A partire dagli spazi colore CIELAB o CIELUV, ideati per affrontare l'uniformità percettiva, sono stati creati molti altri modelli in direzione dell'apparenza del colore, dal modello Retinex di Land e McCann, a quello di Hunt, a quello Nayatani et al., fino ai più moderni CIECAM97s, CIECAM02, iCAM.

L'indice di resa cromatica tenta di misurare quanto l'apparenza del colore degli oggetti sia mantenuta quando osservati sotto una sorgente test. In una scena reale i colori sono raramente visti in isolamento, su uno sfondo neutro, bensì circondati da altri colori, e questo può portare a una alterazione dell'aspetto dei colori stessi. È quindi necessario considerare i colori nel loro contesto.

Proseguendo il lavoro sperimentale dell'annualità precedente [rapporto RdS/2013/108], sono stati raccolti nuovi dati ed è stata eseguita un'analisi approfondita di tutti i risultati ottenuti.

Per il test è stata utilizzata una nota configurazione visiva: il contrasto simultaneo di Albers che produce ampie variazioni nella apparenza di due patch identiche. In questo modo si voleva indagare se e in che misura l'effetto visivo di Albers cambia al variare della sorgente di luce. Sotto una certa sorgente di luce, la configurazione dell'illusione di Albers produce uno spostamento (shift) misurabile dell'apparenza tra le due patch marroni identiche. Nell'esperimento, la scena è uniformemente illuminata dalle sorgenti in prova. Scambiare le sorgenti di luce produce un cambiamento globale uniforme della distribuzione della luce della scena. Allo stesso modo, una misura standard dell'indice di resa cromatica descrive le variazioni di resa dei colori che sono considerate a livello globale nella scena. Le modalità di svolgimento dei test effettuati sono riportate nel rapporto RdS/PAR2013/066.

Lo scopo dell'esperimento era testare se lo shift dell'apparenza resta costante al variare della sorgente di luce. Per quanto si sia cercato di mantenere controllate tutte le fasi dell'esperimento, come riferito nel capitolo relativo ai risultati dell'attività, si sono riscontrate alcune criticità che non consentivano di trarre conclusioni definitive. Allo scopo di superare tali criticità, in particolare quelle riguardanti le differenze tra le patch, nel luglio 2014 è stata effettuata una nuova serie di test presso ENEA di Ispra, con una lieve modifica al protocollo sperimentale. Da una prima valutazione effettuata sui dati si è riscontrato che i risultati che si riferiscono alle due patch target su sfondi diversi, create per generare l'effetto illusorio di differenza, sono viste "uguali" dagli utenti che riescono quindi ad eludere l'illusione ottica. È possibile ipotizzare che l'utente compensi cognitivamente le differenze percettive, confermando così uno dei possibili fraintendimenti rispetto al task assegnato. Per compiere valutazioni finali rispetto questi ultimi dati è necessario svolgere ulteriori indagini.

Una delle possibili direzioni da seguire per risolvere alcune delle criticità presentate, e avere un confronto con i dati ottenuti finora, è quello di progettare un esperimento su web, che permetta a un più alto numero di utenti di effettuare esperimenti simili a quelli qui descritti. Si intende inoltre proseguire anche con esperimenti fisici per ultimare la serie di esperimenti finora presentati.

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Lo studio, inserito all'interno del subtask c.2, costituisce una prosecuzione ed un approfondimento dell'indagine svolta nell'annualità precedente riguardante gli effetti non-visivi dell'illuminazione sulle funzioni cognitive umane. I risultati positivi ottenuti hanno portato ad investigare se uno spettro luminoso ricco di lunghezze d'onda corte abbia un effetto sull'attenzione, influenzando la vigilanza dell'individuo.

All'attività sperimentale hanno partecipato 40 studenti della Facoltà di Ingegneria ed Architettura dell'Università Sapienza di Roma, in egual numero di maschi e femmine, con età tra i 18 ed i 35 anni. L'illuminazione artificiale utilizzata nell'esperimento è stata di tipo diretto, con lampade montate al soffitto, di fronte al partecipante, e sul retro del monitor, direzionate verso il basso. L'esperimento è stato condotto con due tipologie luminose: una piastra LED (0,6 m x 0,6 m) alloggiata nel controsoffitto, composta da 36 LED singoli disposti su tre file con vetro diffondente, e 6 lampade alogene sospese al soffitto senza alcun apparecchio; le caratteristiche luminose sono indicate nella Tabella 111.

Tabella 111. Dati tecnici delle sorgenti utilizzate

	ALOGENE	LED
Flusso luminoso, lm	6x850	3492
Potenza, W	6x53	43
Temperatura di colore, K	2800	4000
Resa cromatica	100	90

Le due sorgenti sono state scelte per il loro differente spettro di emissione: le lampade alogene emettono con uno spettro che presenta valori minimi nelle lunghezze d'onda corte del campo del visibile e cresce in modo continuo per raggiungere valori elevati per lunghezze d'onda lunghe e massimi nell'infrarosso; differentemente, il LED emette solamente nel visibile, con uno spettro che presenta due picchi, uno nella regione del blu ed uno nel giallo.

I soggetti partecipanti sono stati suddivisi in modo casuale in due gruppi che hanno compiuto le stesse prove, ma con scenari luminosi differenti (Tabella 112): il gruppo sperimentale (GS) ha eseguito una sessione base (SB), nella quale sono stati svolti compiti sia visivi che acustici, con l'illuminazione alogena, poi una pausa di 20 minuti senza svolgere compiti, all'inizio della quale è stata cambiata l'illuminazione da alogena a LED, seguita da una sessione test (ST) nella quale sono stati eseguiti nuovamente gli stessi compiti svolti nella sessione base con l'illuminazione LED. Il gruppo di controllo (GC) ha svolto lo stesso protocollo continuando a mantenere l'illuminazione alogena anche dopo la sessione base, sia durante la pausa che durante la sessione sperimentale.

Tabella 112. Sorgenti luminose utilizzate nelle diverse fasi dell'esperimento

GRUPPO	SESSIONE BASE	PAUSA	SESSIONE TEST
sperimentale	alogena	LED	LED
controllo	alogena	alogena	alogena

In ogni sessione i partecipanti hanno eseguito due test, una prova di vigilanza visiva ed una prova di vigilanza acustica, entrambe effettuate al computer con un programma che ha presentato gli stimoli ed ha registrato i tempi di risposta dei soggetti. Nel test di vigilanza visiva gli stimoli consistono in un quadrato rosso (RGB: 255,0,0) ed un quadrato verde (RGB 0,192,0), entrambi di lato 3 cm, presentati a monitor in sequenza alternata; ogni stimolo è stato presentato per 500 ms, con un intervallo tra uno stimolo e l'altro sempre di 500 ms. Il soggetto doveva rispondere, cliccando il tasto sinistro del mouse il più velocemente possibile, quando gli veniva presentato lo stimolo bersaglio che consisteva nella ripetizione di un quadrato con lo stesso colore (rosso-rosso o verde-verde). La prova è durata circa 14 minuti, durante i quali sono stati presentati a monitor 800 stimoli, dei quali 64 erano stimoli bersaglio; questi ultimi sono stati presentati in modo casuale, ma in modo che mediamente comparissero 11 stimoli bersaglio ogni 2 minuti.

Nel test di vigilanza acustica due diversi stimoli acustici chiaramente distinguibili dall'orecchio umano come suoni differenti, uno a 600 Hz ed uno ad 800 Hz, della stessa intensità (60 Db) venivano emessi da due casse poste ai lati del monitor, con una sequenza alternata; ogni stimolo aveva la durata di 100 ms, mentre l'intervallo tra due stimoli consecutivi era di 500 ms. La struttura della prova, nella durata, numero di stimoli e sequenza, è identica alla prova di vigilanza visiva. Anche in questo test il soggetto doveva rispondere, cliccando il tasto sinistro del mouse il più velocemente possibile, quando gli veniva presentato lo stimolo bersaglio, che in questo caso consisteva nella ripetizione di un suono della stessa frequenza. Lo schermo del monitor è rimasto nero per tutta la durata del test.

Una metà dei soggetti, sia del GS che del GC, ha eseguito entrambi i test nella SB, svolgendo prima il test di vigilanza visiva e successivamente il test di vigilanza acustica, per poi ripetere entrambi i test con lo stesso ordine nella ST; l'altra metà dei soggetti ha eseguito sia nella SB che nella ST gli stessi compiti ma svolgendo prima il test di vigilanza acustica e poi il test di vigilanza visiva. In questo modo si è potuto escludere un effetto legato all'ordine

di presentazione dei due test. Per ogni soggetto partecipante, sono stati elaborati separatamente i dati dei compiti visivi e di quelli acustici, nonché le prove della sessione base da quelle della sessione test. In ciascuna prova le risposte sono state suddivise in 7 intervalli di 2 minuti ciascuno, ed all'interno di ciascun intervallo è stata calcolata la media dei tempi di risposta.

Il confronto degli andamenti dei tempi medi di risposta in funzione del tempo della prova suddiviso nei 7 intervalli, mostra una differenza tra il test visivo ed il test acustico. Nel test visivo (Figura 409) è stato registrato un decremento di vigilanza nella SB in entrambi i gruppi, indicato da un aumento dei tempi di risposta con il trascorrere dei minuti, mentre nella ST i tempi di risposta del GS diminuiscono e del GC aumentano; i risultati sembrerebbero indicare che vi sia un aumento della vigilanza durante la prova visiva svolta con illuminazione LED, mentre nelle prove svolte con le lampade alogene la vigilanza diminuisca con il procedere della prova. Nel test acustico è stato riscontrato un decremento di vigilanza per entrambi i gruppi durante l'esecuzione del compito, sia nella SB che nella ST: l'andamento crescente di tutte le curve dei test acustici (Figura 410) indica un aumento dei tempi medi di risposta in tutte le prove acustiche. I risultati del test acustico sembrerebbero indicare l'inesistenza di un effetto sulla vigilanza acustica dovuto alla differente illuminazione.

Dunque la differente tipologia luminosa sembrerebbe avere un effetto strettamente sulla prestazione acustica ma non sulla vigilanza in compiti acustici. Infatti, con il LED i soggetti mostrano tempi di risposta più rapidi nei singoli intervalli, ma nel corso dell'esperimento si registra un decremento di vigilanza, perché i tempi di risposta aumentano con il procedere della prova. Al contrario, l'illuminazione LED parrebbe influenzare la vigilanza in compiti visivi, nonostante l'assenza di un effetto sulla prestazione visiva.

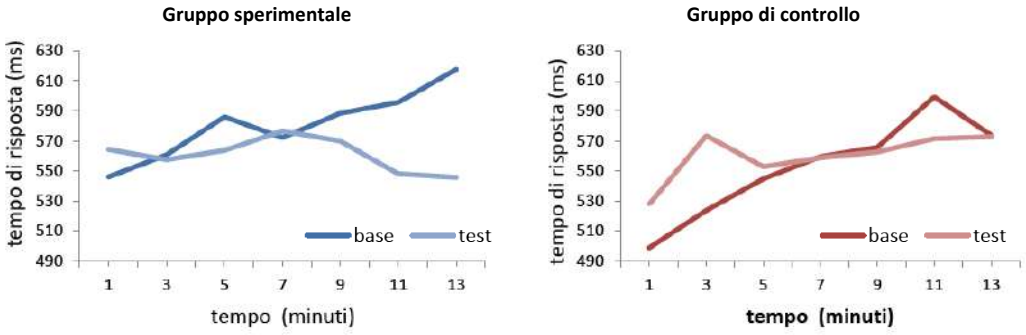


Figura 409. Test visivo: andamento dei tempi di risposta durante le prove per il gruppo sperimentale e per il gruppo di controllo

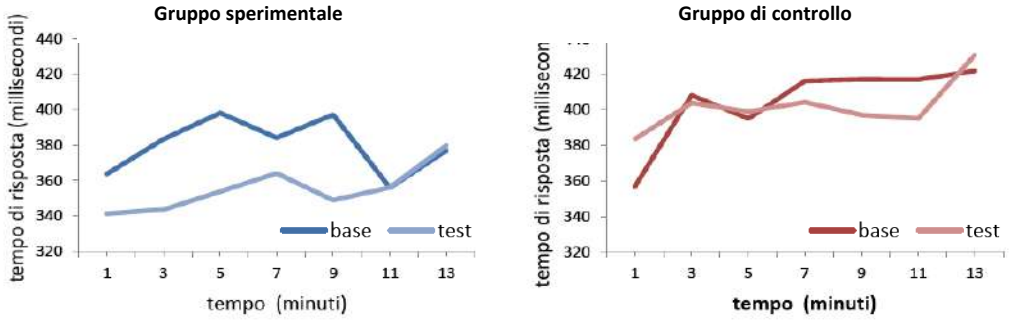


Figura 410. Test acustico: andamento dei tempi di risposta durante le prove per il gruppo sperimentale e per il gruppo di controllo

Successivamente, con l'intento di capire se vi fossero differenze di genere negli andamenti della vigilanza, l'analisi sui dati è stata ripetuta distinguendo i risultati dei partecipanti di genere maschile (M) da quelli delle partecipanti di genere femminile (F).

Il calcolo dei tempi medi di risposta dei soggetti femminili e dei soggetti maschili nei 7 intervalli in cui è suddiviso il tempo di svolgimento delle prove, dà luogo ad andamenti differenti tra M ed F nella prova test del gruppo sperimentale sia nel test visivo che nel test acustico (Figura 412 e 413); al contrario, gli andamenti del gruppo di

controllo, non mostrano differenze rilevanti tra soggetti M ed F, mostrando in tutti i casi, SB e ST, di prove acustiche e visive, un incremento nei tempi di risposta con il procedere dell'esperimento.

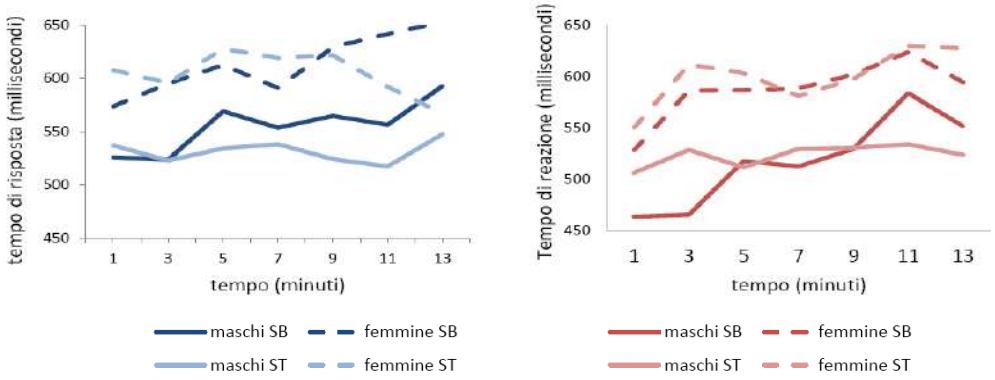


Figura 411. Test visivo: andamento dei tempi di risposta durante le prove suddivisi in maschi e femmine

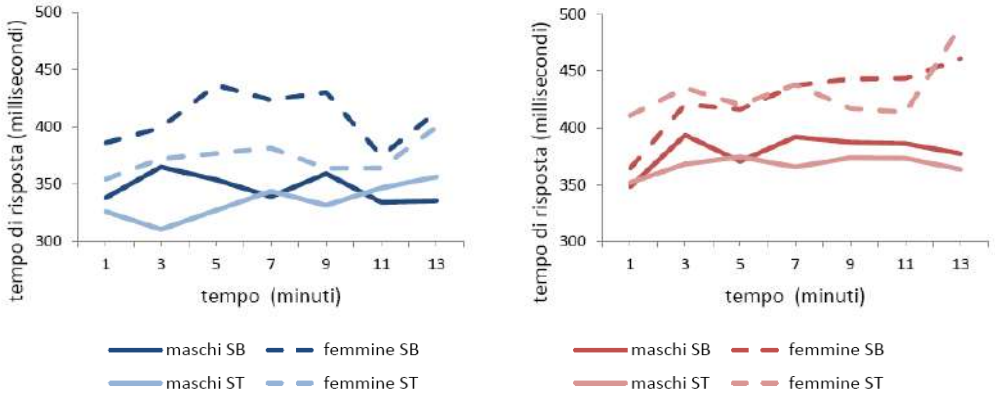


Figura 412. Test acustico: andamento dei tempi di risposta durante le prove suddivisi in maschi e femmine

La differenza più rilevante tra gli andamenti di M e F nel gruppo sperimentale si manifesta nel test visivo: solamente l'andamento della curva del genere F registra un decremento dei tempi di risposta nella ST, ma non quella dei maschi che mostra un andamento crescente, seppur leggermente. Le due curve M ed F relative alla SB non mostrano invece particolarità degne di nota, avendo entrambe un andamento crescente che mostra un tipico aumento dei tempi di risposta con il tempo di svolgimento dell'esperimento. Il confronto degli andamenti del GS sembrerebbe indicare che la diversa tipologia di sorgente luminosa ha effetti unicamente sulla vigilanza del genere F nell'esecuzione di compiti visivi, riducendo i tempi di risposta col procedere del tempo.

Sembrerebbe che la differente illuminazione non abbia effetto sulla vigilanza acustica né nei soggetti M, né nei soggetti F; parrebbe invece esserci un effetto dell'illuminazione sulla prestazione dei soli soggetti F, che sono più veloci nel dare la risposta con la luce LED rispetto ai soggetti M; lo stesso incremento di velocità nei tempi di risposta non avviene con l'illuminazione fornita da lampade alogene.

La mancanza di un effetto dell'illuminazione LED sulla vigilanza acustica potrebbe essere dovuto alla durata del test, troppo breve per registrare un incremento della vigilanza in compiti acustici che risultano relativamente semplici da eseguire. Lo studio sulla vigilanza sarà approfondito in futuro effettuando un secondo esperimento nel quale verrà utilizzato un paradigma cross-modale, nel quale saranno presentati contemporaneamente ed in modo sincronizzato un compito di vigilanza visiva ed un compito di vigilanza acustica, così da incrementare la difficoltà di esecuzione piuttosto che aumentare la durata del test, per evitare di introdurre effetti di stanchezza dovuti alla lunghezza temporale dell'esperimento che falserebbero i risultati.

I risultati sembrerebbero confermare ricerche precedenti sulla capacità della luce blu di produrre effetti non-visivi, non solamente sui ritmi circadiani, ma anche sulla mente umana.

Il confronto con le sorgenti tradizionali indica come il LED abbia un effetto positivo sulla vigilanza e sulle funzioni esecutive, che le lampade alogene non producono: tale effetto è stato imputato alla particolare composizione

spettrale del LED con un picco nel campo del blu ed un picco nel campo del giallo. È importante notare come la lampada LED utilizzata emettesse una luce bianca con temperatura di colore di 4000 K, e che dunque la componente blu nello spettro fosse percentualmente inferiore a quella gialla; l'aver riscontrato effetti positivi anche con tale composizione spettrale indica che non serve una luce monocromatica blu, ma anche una luce bianca è in grado di incrementare prestazioni cognitive, e che non è necessaria una temperatura di colore molto elevata ma è sufficiente una temperatura di colore neutra.

I risultati ottenuti hanno grande importanza a livello scientifico perché sono un primo indizio di come uno specifico spettro luminoso abbia la capacità di influenzare i meccanismi mentali, ed aprono un campo di indagine alla ricerca futura in cui devono essere sia approfonditi quanto ampliati.

In particolare è importante indagare quale sia l'influenza delle caratteristiche ambientali sui risultati ottenuti, ossia come questi possano modificarsi in funzione di un differente layout sperimentale, per poter successivamente trasmettere l'attività ad applicazioni reali. Oltre alla temperatura di colore delle lampade, fattori che possono incidere sulle prestazioni dell'individuo, sia sul piano psicologico che fisiologico, sono il posizionamento delle sorgenti rispetto al soggetto, il livello di illuminamento fornito sia all'occhio che sul piano si lavoro, il coefficiente di riflessione del materiale presente sulle pareti, nonché la presenza e la dimensione delle aperture che danno ingresso alla luce naturale; tali elementi, infatti, influiscono sia sulla quantità che sulla qualità della radiazione luminosa che colpisce la retina.

A livello progettuale i risultati sperimentali complessivi ottenuti nei due studi svolti hanno risvolti pratici interessanti, per la loro diretta applicabilità nel progetto illuminotecnico di edifici quali scuole, uffici, ospedali, torri di controllo ecc., con l'intento di facilitare i compiti cognitivi ed aumentare la produttività, o semplicemente per ridurre situazioni di pericolo. A causa dei possibili rischi per la salute umana derivanti dall'utilizzo indiscriminato di sorgenti luminose con elevata percentuale di radiazione blu, deve comunque essere sempre raccomandata una progettazione consapevole.

Una descrizione dettagliata dei risultati dello studio è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/067.

CRIET Centro Interuniversitario in Economia del Territorio

ENEA ha richiesto a CRIET di predisporre un primo prototipo per il monitoraggio real time delle prestazioni illuminotecniche degli impianti di pubblica illuminazione. CRIET ha pertanto messo a disposizione la propria esperienza nello sviluppo di programmi per la pubblica amministrazione e le competenze presenti al suo interno per implementare uno strumento che consenta ai responsabili comunali di monitorare e gestire al meglio gli impianti di pubblica illuminazione presenti sul loro territorio.

L'introduzione di un sistema per il controllo delle prestazioni e dell'efficienza energetica degli impianti di pubblica illuminazione costituisce una fase di estrema importanza all'interno dei progetti di ammodernamento e gestione del servizio in quanto permette all'amministrazione di conseguire una pluralità di vantaggi:

a) permette di monitorare costantemente la qualità dei servizi di cui la cittadinanza può beneficiare grazie agli interventi di riqualificazione realizzati sul sistema illuminotecnico comunale;
b) favorisce il monitoraggio delle prestazioni raggiunte dalla rete di pubblica illuminazione, garantendo il rispetto dei criteri ottimali di funzionamento individuati dai responsabili comunali
c) permette la puntuale individuazione di anomalie o disfunzionamenti dell'impianto, consentendo ai tecnici comunali di intervenire puntualmente per evitare eccessivi consumi e disservizi
d) consente di avviare una gestione trasparente del servizio di pubblica illuminazione e di condividere con la cittadinanza i risultati ottenuti.

Il software ed il suo funzionamento

Il prototipo progettato e realizzato da CRIET ed ENEA nel corso della presente annualità è formato da due sezioni: una prima nella quale si procede all'ottenimento delle informazioni relative alle caratteristiche dei quadri elettrici e delle zone stradali che concorrono a formare il sistema di pubblica illuminazione analizzato e una seconda all'interno della quale sono elaborate le valutazioni sulle caratteristiche e sulle prestazioni degli impianti.

Più nel dettaglio, nella *sezione di input,* l'analisi dello stato di fatto dell'impianto consente di recuperare le informazioni necessarie per definire le soluzioni adottate in sede di installazione e le caratteristiche dell'impianto stesso. Questi dati sono necessari per definire quali dovrebbero essere le prestazioni che il sistema di pubblica illuminazione è in grado di offrire alla collettività. L'acquisizione puntuale e metodica delle informazioni avviene mediante tre moduli che consentono al software di archiviare i dati richiesti nella sezione successiva per il calcolo dei KPI. I moduli che compongono la sezione di input sono pertanto:

- Modulo per l'acquisizione delle informazioni relative ai quadri elettrici;
- Modulo per l'acquisizione delle informazioni relative alle zone stradali;
- Modulo per la definizione del profilo di funzionamento degli impianti oggetto d'analisi.

La seconda *sezione di valutazione* si compone di quattro moduli all'interno dei quali, utilizzando le informazioni precedentemente acquisite dal software, vengono realizzate una serie di confronti per elaborare i KPI. Nello specifico, alcuni indicatori di performance sono elaborati una tantum all'avvio del processo di monitoraggio della rete, mentre altri sono calcolati periodicamente dal software ad ogni di dati sul funzionamento degli impianti. Più nel dettaglio, le elaborazioni riguardano:

1. *KPI di progetto*, calcolati per fornire indicazioni sugli impianti di pubblica illuminazione e sulla loro conformità alla normativa in virtù del contesto nel quale sono installati;
2. *KPI di performance,* calcolati al fine di creare un sistema di monitoraggio puntuale che consenta di elaborare valutazioni in merito al corretto funzionamento degli impianti;
3. *Indicatori di diagnostica*, calcolati allo scopo di evidenziare anomalie e scostamenti funzionali nel funzionamento degli impianti rispetto a quanto stabilito nei profili di funzionamento comunali;
4. *Benchmarking,* ovvero indicatori grafici per il confronto dei dati periodicamente acquisiti con parametri di riferimento, elaborati al fine di fornire indicazioni relative alle prestazioni degli impianti analizzato è in grado di garantire.

Il prototipo rappresenta dunque un importante tool che, nella sua versione finale, potrà essere utilizzato dalle amministrazioni locali intenzionate ad ottimizzare i consumi e le prestazioni del proprio sistema di pubblica illuminazione, nonché interessate a monitorare i propri impianti per garantirne un corretto funzionamento.

Una nuova release del software City Profiler IP

Nel corso delle precedenti annualità, CRIET ha partecipato attivamente allo sviluppo del progetto Lumière offrendo le proprie competenze e conoscenze per promuovere una diffusione della cultura illuminotecnica all'interno delle amministrazioni locali e realizzando software che, garantendo una più agevole gestione dei processi di efficientamento energetico, incentivassero i responsabili dei Comuni ad intraprendere i lavori di ammodernamento della rete di pubblica illuminazione.

Nella presente annualità CRIET ha realizzato un upgrade del software City Profiler IP sviluppato in precedenza. Lo strumento, destinato ai Comuni italiani, offre ai tecnici e agli amministratori locali la possibilità di controllare tutti i passaggi del processo di efficientamento della rete di pubblica illuminazione, nonché di compiere importanti valutazioni in merito all'adozione degli Smart services.

I risultati restituiti dalla nuova release ai quali è possibile pervenire grazie all'utilizzo della release del City Profiler IP offrono la possibilità di supervisionare l'intero quadro delle operazioni di messa a norma e riqualificazione del sistema di pubblica illuminazione comunale, verificando gli interventi che si prevede di realizzare, i costi che si ritiene debbano essere sostenuti ed i benefici che si prevede possano essere ottenuti. Inoltre, per le amministrazioni comunali il software rappresenta uno strumento per indirizzare le azioni di efficientamento, in quanto permette di promuovere la realizzazione di progetti unitari che prevedano, sin dalla fase di ideazione, interventi strutturali ed integrati tra loro.

Il software 2014, che per essere correttamente utilizzato richiede al Comune di aver già terminato sia i lavori di censimento dei propri impianti sia la stesura del progetto preliminare per la riqualificazione e l'efficientamento degli stessi, si compone di cinque moduli:

a) Anagrafica: modulo progettato per l'acquisizione di informazioni utili alla profilazione del Comune;
b) Input: modulo per l'upload dei documenti contenenti i dati relativi allo stato di conservazione degli impianti di pubblica illuminazione e la descrizione degli interventi di riqualificazione ed efficientamento individuati dai responsabili incaricati dall'amministrazione comunale;
c) Dati Gestionali: modulo per il reperimento delle informazioni relative agli attuali costi di gestione della rete di pubblica illuminazione e la definizione delle modalità con cui il Comune intende sostenere gli investimenti necessari ad avviare i lavori di ammodernamento del sistema di pubblica illuminazione;
d) Setup Costi: modulo la definizione dei costi dei singoli interventi contenuti nel documento di progettazione fornito dall'amministrazione comunale;
e) Risultati: modulo per la restituzione all'utente dei risultati elaborati dal software. In particolare, il programma fornisce due output:
   - un documento contenente le operazioni di efficientamento e la relativa valorizzazione;
   - un documento riepilogativo all'interno del quale sono presentati i vantaggi di cui potrà beneficiare il Comune a seguito delle operazioni sulla rete di pubblica illuminazione.

In estrema sintesi, il software rappresenta uno strumento prezioso per i responsabili comunali in quanto consente di elaborare diverse situazioni e di ottenere una valutazione economico-finanziaria delle possibili scelte a disposizione del Comune. Informazioni sul software "City Profiler" per il supporto all'efficientamento energetico e il monitoraggio degli impianti illuminotecnici sono contenute nel rapporto RdS/PAR2013/069.

ASSISTAL

Nel corso del 2014 ASSISTAL ha recepito l'invito pervenuto da ENEA ad aderire al Progetto Lumière per mettere a disposizione del gruppo di lavoro l'esperienza acquisita nel tempo dai propri associati nell'ambito della pubblica illuminazione.

I rapporti di collaborazione avviati dal team Lumière con numerosi Comuni italiani hanno permesso di individuare la necessità di sviluppare progetti volti a supportare concretamente le amministrazioni locali interessate ad avviare percorsi di riqualificazione ed efficientamento energetico dei sistemi di pubblica illuminazione. In particolare, è emerso il bisogno di reperire sul mercato soluzioni propedeutiche al contenimento dei costi a carico delle amministrazioni comunali e, allo stesso tempo, adatte a favorire il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Allo scopo di estendere i benefici dei prodotti realizzati al più ampio numero possibile di amministrazioni italiane, ENEA ha avviato un rapporto di collaborazione con Consip S.p.A.. A seguito di una attenta disamina del contesto illuminotecnico nazionale, si è ritenuto che l'obiettivo per la presente annualità potesse essere la progettazione di uno strumento finalizzato a velocizzare le operazioni necessarie all'indizione di una gara ad evidenza pubblica per l'ammodernamento e la messa a norma degli impianti di pubblica illuminazione.

Al termine dei lavori di studio e analisi del settore illuminotecnico italiano, è così emerso che il prodotto di maggior interesse per le amministrazioni comunali italiane potesse essere costituito dalle schede censimento. Si è infatti ritenuto che la disponibilità di tale documento sul mercato elettronico potesse fornire un supporto efficace ed efficiente per avviare con successo il percorso di riqualificazione degli impianti illuminotecnici.

Attraverso l'introduzione delle schede censimento sul Mercato Elettronico per la Pubblica Amministrazione si ritiene sia possibile perseguire una pluralità di obiettivi, tra i quali si annoverano certamente:

- definizione delle informazioni che devono necessariamente essere contenute all'interno di un censimento degli impianti di pubblica illuminazione affinché siano raccolti tutti i dati richiesti per eseguire le attività che trovano nel censimento stesso un punto di partenza;
- definizione di un tariffario di riferimento a livello nazionale per le attività di censimento della rete di pubblica illuminazione;
- apertura del mercato alla libera concorrenza, con conseguenti benefici sia per le amministrazioni comunali che possono reperire un prodotto di qualità a prezzi concorrenziali, sia per i professionisti del settore che hanno l'opportunità di offrire i propri servizi anche ad amministrazioni situate in zone diverse da quelle in cui normalmente esercitano la loro attività;
- creazione dei presupposti necessari per inserire sul MePA tutte le attività e i servizi connessi con gli interventi di efficientamento e messa a norma del sistema di pubblica illuminazione.

Al termine delle attività di studio ed analisi del settore illuminotecnico nazionale, oltre a numerosi incontri con i tecnici di Consip S.p.a. per il perfezionamento dei contenuti, ASSISTAL ha quindi elaborato le schede censimento da immettere sul MePA. In particolare, oltre ad un indispensabile modulo preliminare per la raccolta di dati relativi all'anagrafica comunale, il documento si compone di:

a) modulo per l'acquisizione di informazioni relative al censimento dei quadri elettrici;
b) modulo per l'acquisizione di informazioni relative al censimento dei punti luce;
c) modulo per l'acquisizione di informazioni relative ai consumi di energia elettrica;
d) modulo per l'acquisizione di informazioni relative alla manutenzione.

Le schede censimento rappresentano un servizio che sarà accessibile da tutte le amministrazioni italiane interessate tramite MePA. Grazie all'acquisto delle schede censimento, i Comuni avranno la possibilità di avviare l'analisi del proprio sistema di pubblica illuminazione ad un prezzo competitivo e con la garanzia che i lavori saranno eseguiti rispettando i requisiti richiesti dalle successive attività che compongono un programma di efficientamento degli impianti. L'obiettivo di ENEA, ASSISTAL e Consip per le prossime annualità, infatti, è proseguire nella definizione di prodotti standard che consentano alle amministrazioni locali di completare l'intero ciclo di messa a norma e riqualificazione della rete di pubblica illuminazione.

Ulteriori dettagli sono riportati nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/070.

d. Tecnologia per l'industria del freddo

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Chimica

Il contenuto della collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università Sapienza di Roma è stato lo studio di materiali avanzati, quali polimeri, complessi metallici, nanoparticelle metalliche e compositi, per sviluppare un approccio innovativo per lo studio dell'interazione con etilene, protagonista nei processi di maturazione post-raccolta di frutti climaterici. Tale studio si inserisce nell'ambito delle attività relative al subtask d.1, che hanno per oggetto la realizzazione di un prototipo di sensore a basso costo per le celle frigorifere.

Lo studio si è articolato in due fasi: nella prima fase del lavoro sono stati preparati i materiali polimerici adattando ai sistemi specifici consolidate procedure di laboratorio. La selezione dei materiali polimerici è stata effettuata in base alle proprietà di conducibilità e solubilità. Inoltre è stata curata la deposizione dei materiali in forma nano strutturata attuando delle tecniche di precipitazione controllata. Le caratterizzazioni morfologiche e spettroscopiche hanno guidato in un meccanismo di back and forward la preparazione dei materiali. Una volta preparati in forma nano strutturata essi sono stati depositati su opportuni substrati verificandone adesione e morfologia.

I materiali utilizzati sono stati: il polifenilacetilene (PPA) preparato in laboratorio, il poli(3-dimetilammoniocloruro-1propino), p(DMPA-HCl) preparato in laboratorio e la polianilina (PANI), prodotto commerciale (Aldrich).

Nella seconda fase del lavoro sono state preparate nanoparticelle d'oro e di argento funzionalizzate con leganti idrofilici, ed in particolare sono stati preparati sistemi core shell, ovvero nano particelle d'oro o argento stabilizzate con il legante polimerico di sintesi p(DMPAHCl). Parallelamente sono stati utilizzati leganti organici o organometallici a delocalizzazione elettronica caratterizzati dalla presenza di due gruppi tiolici potenzialmente ancoranti (4,4'-ditiotrifenile e complessi dinucleari di Pt(II) e Pd(II) contenenti uno spaziatore organico a delocalizzazione elettronica). In generale, i leganti sono stati selezionati in base alla loro capacità di interagire con l'etilene e/o alla possibilità di essere funzionalizzati con cationi/complessi metallici (principalmente Cu e Ag) che possano incrementare la sensibilità dei materiali nei confronti dell'analita. Sono state isolate nano particelle metalliche di dimensioni controllate (tipicamente al di sotto dei 10 nm).

Parallelamente sono stati preparati i compositi tra nanoparticelle metalliche funzionalizzate e polimeri, in particolare PPA e PANI. Questi sono stati studiati in dettaglio sia dal punto di vista morfologico che strutturale e sono state curate le tecniche di deposizione più opportune per la realizzazione di film su specifici substrati adatti per misure elettriche. E' stata utilizzata la tecnica di deposizione controllata basata sull'osmosi che ha portato all'ottenimento di nano strutture diverse, ad elevata estensione superficiale e contenenti le nano particelle metalliche all'interno. Questi compositi sono stati studiati in dettaglio sia dal punto di vista morfologico che strutturale e sono state curate le tecniche di deposizione più opportune per la realizzazione di film su specifici substrati adatti per misure elettriche.

Sono stati infine effettuati dei test sui materiali sintetizzati per valutarne la possibile applicazione come assorbitori di etilene. Si è scelto di utilizzare un metodo rapido ed economico per la valutazione dell'effetto direttamente sui frutti, mediante rilevamenti colorimetrici della buccia. In questi esperimenti sono state selezionate delle banane che erano già state indotte al ripenio e di conseguenza, la produzione di etilene endogeno ed i processi di ripening erano già fase di svolgimento sia nei campioni del controllo (bianco) che in quelli in presenza dei materiali assorbitori. I materiali studiati sono stati film dei complessi binucleari di Pt(II) e Pd(II) dispersi in matrice polimerica di PPA. Si è potuto osservare un effetto esercitato dai materiali a base di Pd (II) e Pt (II) sull'evoluzione del colore: le banane mantenute in presenza dei complessi di Pd(II) e Pt(II) hanno mostrato una maggiore stabilità nel tempo ed un ritardo nella maturazione rispetto al controllo. Questi studi andranno approfonditi con ulteriori prove, utilizzando frutti provenienti da coltivazioni certificate, per poter verificare l'effetto di assorbimento ed il ritardo nella maturazione, ma sembrano risultati incoraggianti anche per il successivo utilizzo delle nano particelle metalliche stabilizzate con i tioli organometallici.

Alla luce dei primi risultati ottenuti e sulla base della letteratura, è stato deciso di indirizzare lo studio verso lo sviluppo di sensori chemoresistivi in cui il materiale attivo fosse costituito da compositi posti su una matrice conduttiva. La matrice conduttiva scelta a tale scopo è stata la polianilina per le sue note proprietà di conduzione, in particolare se trattata con acidi. I compositi sono stati quindi depositati per drop casting su elettrodi interdigitati e testati come materiali attivi per sensori di etilene utilizzando il set-up messo a punto presso i laboratori dell'ENEA Casaccia. Particolare attenzione è stata in questa fase rivolta alla deposizione dei materiali. La deposizione per drop-casting, infatti, non assicura riproducibilità ed uniformità del film e del suo spessore, mentre nella procedura di spin coating, si possono osservare difficoltà di bagnabilità. Dopo alcuni test sperimentali volti ad individuare il substrato ottimale per le misure (allumina), sono state testate condizioni differenti di deposizione

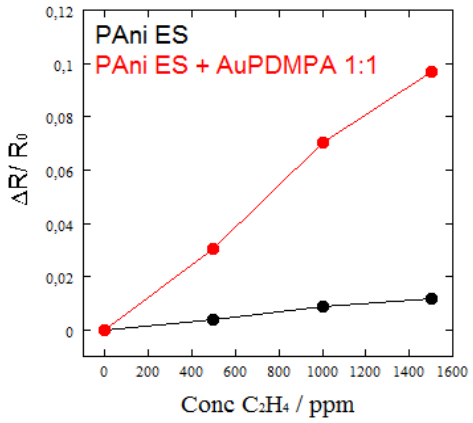


Figura 413. Misure di resistenza effettuate su PANI(ES) e sul composito PANI(ES)/Au-p(DMPA-HCl) al variare della concentrazione di C_2H_4

per drop casting, variando il solvente e la concentrazione delle soluzioni. La condizione di deposizione dei film ottimale è stata individuata nell'uso di una soluzione di composito in dimetil-formammide alla concentrazione di 0,5 mg/mL. Le misure sono state effettuate in condizioni di umidità relativa del 50% e mantenendo un flusso di etilene. I risultati preliminari, riassunti in Figura 413, suggeriscono che la presenza delle nanoparticelle Au@PDMPA porti ad un aumento di sensibilità della PANI nei confronti dell'analita. Tuttavia, saranno necessarie altre prove per confermare questi risultati e per escludere l'effetto di possibili interferenti, come ad esempio quello di piccole oscillazioni di umidità che sono inevitabili impiegando questo apparato sperimentale.

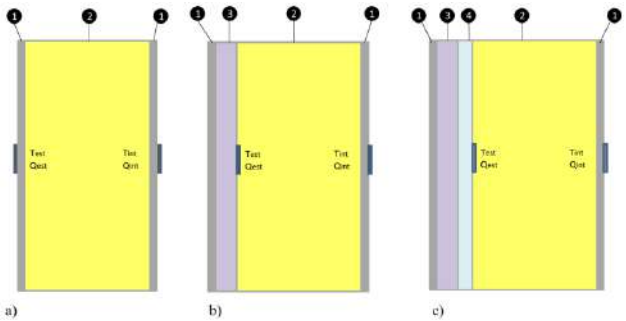
Per informazioni dettagliate sulle attività di preparazione dei materiali in studio e sui risultati delle prove effettuate si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/073.

Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Il lavoro svolto nella presente annualità si inserisce nel subtask d.2 e tratta il tema dell'innovazione tecnologica nel trasporto refrigerato su vagoni ferroviari perseguita attraverso l'uso di materiali a mambiamento di fase nella costruzione dei pannelli destinati alla realizzazione delle celle frigorifere.

Alla luce di quanto emerso dai lavori dell'anno precedente, si è proceduto alla progettazione termica e tecnologica dei pannelli e al successivo utilizzo dei prototipi prodotti nelle sperimentazioni di laboratorio indoor ed outdoor. Le prime sono state necessarie per validare i risultati delle elaborazioni numeriche effettuate sulla stratificazione del pannello, le seconde hanno avuto lo scopo di confrontare le prestazioni energetiche delle celle dotate di PCM con quelle tradizionali, usate attualmente nel trasporto di merci deperibili.

Le analisi numeriche sono state effettuate mediante il software COMSOL Multiphysics®, interfacciato con il Heat Transfer Module che offre strumenti di simulazione dei i meccanismi di scambio termico . Con questo strumento di calcolo agli elementi finiti (FEM) è stato possibile simulare il comportamento termico delle diverse opzioni stratigrafiche ed i risultati ottenuti hanno permesso di confrontare le stratigrafie ipotizzate in termini di riduzione dei flussi termici entranti e delle temperature superficiali interne alla cella raggiunte sotto particolari condizioni ambientali esterne. Come si vede Figura 414, sono state messe a confronto due possibili stratigrafie innovative con quella tradizionale di base. La prima stratigrafia deriva da quella base, implementata con lo strato di PCM posizionato prima della superficie di finitura esterna, mentre la seconda introduce una intercapedine tra PCM e strato isolante. Quest'ultimo modello funzionale è stato ipotizzato con l'obiettivo di accelerare la solidificazione del PCM e permettere la ciclicità di funzionamento giornaliero.



Strato	Materiale	Spessore [mm]
1	lamiera d'acciaio	1
2	poliuretano espanso	100
3	PCM	30
4	aria	20

Figura 414. Tipologie innovative di serigrafie analizzate

Le simulazioni sono state articolate con una serie di condizioni al contorno e cioè: considerando l'ipotesi di pannelli applicati a carro ferroviario a temperatura controllata, viaggiante con due diverse velocità (0 e 60 km/h), tenendo conto di diverse condizioni climatiche caratteristiche delle tre ipotetiche fasce geografiche di Italia: Nord, Centro e Sud. Sotto queste condizioni sono state ripetute simulazioni utilizzando 9 diversi PCM. I risultati delle simulazioni riguardano la valutazione delle temperature superficiali interne ed esterne e dei flussi termici nel pannello orientato via, via a: Nord, Sud, Ovest, Est ed Orizzontale. Ad esempio, in Figura 415 vengono riportati gli i

risultati grafici delle simulazioni eseguite per pannello orientato a Nord, realizzato con PCM RT 35 messo a confronto con quello utilizzante la paraffina RT35HC sia con che senza intercapedine e con il mezzo ferroviario fermo, nelle condizioni ambientali della località Ancona, al Centro Italia.

Tra gli obiettivi delle simulazioni uno dei più significativi è stata la scelta del PCM con le migliori prestazioni per l'uso nella costruzione dei pannelli prototipo. Per le sue rilevanti caratteristiche termiche e le prestazioni risultanti dell'intera stratificazione, si è optato per il Rubitherm RT 35 HC.

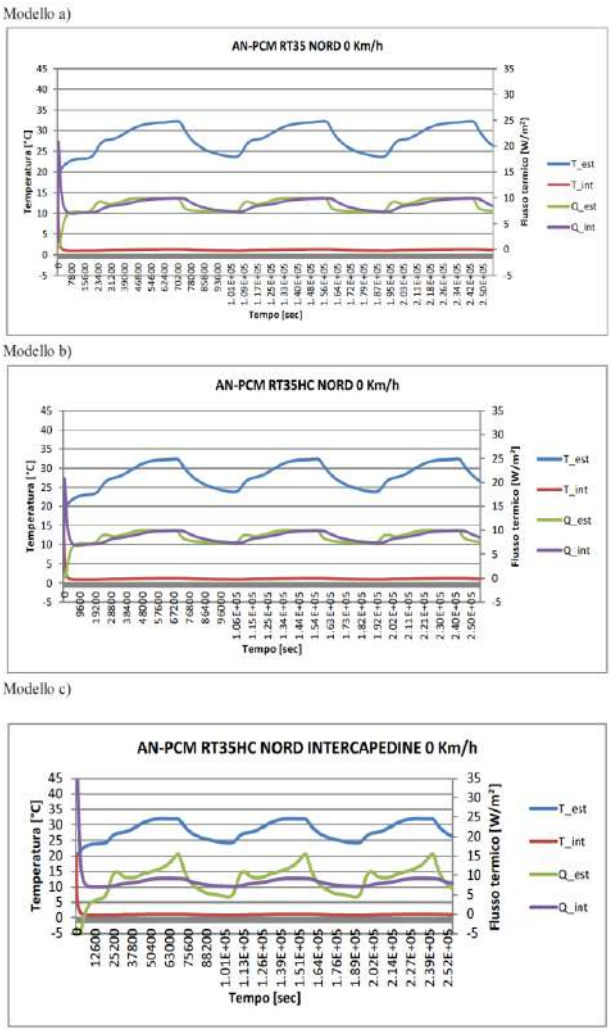


Figura 415. Risultati delle simulazioni eseguite per pannello orientato a Nord, realizzato con PCM RT 35 a confronto con quello utilizzante la paraffina RT35HC (con intercapedine e senza) e in diverse condizioni ambientali della località Ancona

Particolarmente importante è stata la progettazione e messa a punto del sistema di packaging necessario al contenimento del PCM e del metodo di inserimento dei PCM con lo strato isolante del pannello. Il risultato è stata la realizzazione di contenitore con 81 vaschette, aventi dimensioni 5 cm x 5 cm x 3 cm di profondità, che sono state riempite con la paraffina e successivamente sigillate a 170°C e 3 bar di pressione con un foglio bistrato alluminio-polimero.

Le elaborazioni numeriche hanno portato a definire completamente la stratificazione del pannello con il corretto posizionamento degli strati per ottenere le migliori prestazioni che è risultata: 1 lamierino esterno, 2 strato di sigillatura PCM, 3 strato di PCM, 4 telaio, 5 poliuretano espanso, 6 lamierino interno.

I test indoor per la caratterizzazione dei pannelli sono stati eseguiti in una camera climatica che ha la caratteristica di riprodurre le condizioni ambientali desiderate, compreso il flusso solare che stato riprodotto con un simulatore solare costituito da 16 proiettori OSRAM Ultra-Vitalux, riproducenti una radiazione con uno spettro molto simile a quella della radiazione solare.

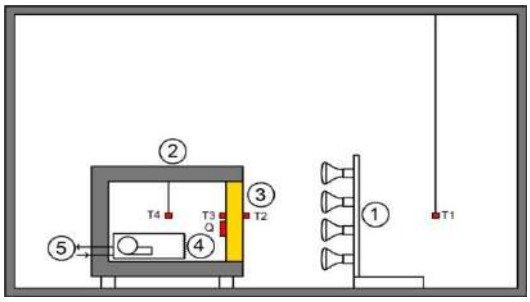


Figura 416. Schema della camera climatica climatica utilizzate per i test

Per eseguire il confronto tra il pannello contenente il PCM e quello tradizionale, è stato allestito un sistema di prova all'interno della camera climatica (Figura 416) nel quale Il pannello in prova è stato inserito a chiusura di un lato di un box refrigerato per effetto di un ventil-convettore (4) alimentato con fluido freddo termostatato in bagno termostatico (5). Il pannello viene irraggiato con il simulatore solare (1) mantenendo la temperatura interna del box a valori di circa 5 °C e quella esterna a 32 °C. In queste condizioni sono monitorati i valori di temperatura e di flusso termico sulle superfici interna ed esterna del pannello ed il valore di temperatura dell'aria sia nella camera climatica che all'interno del box.

Tra i risultati dell'analisi è possibile osservare (Figura 417) come la temperatura superficiale esterna sia influenzata dal comportamento termico del PCM.

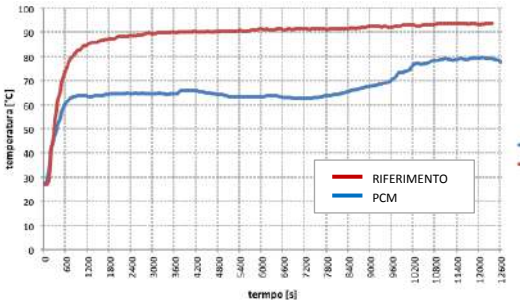


Figura 417. Analisi di confronto fra le prestazioni del nuovo pannello rispetto al tradizionale

L'analisi outdoor è stata condotta utilizzando le due celle frigorifere acquistate nel primo anno della ricerca ed installate all'aperto presso Laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Per implementare la parete della cella con involucro innovativo con il materiale in passaggio di fase, sono stati prodotti ed utilizzati 28 contenitori sigillati di PCM, distribuiti 8 a 8 sulle tre superfici Est, Sud, Ovest e 4 sulla copertura. In seguito gli strati di PCM così realizzati sono stati, protetti con fogli di lamierino plastificato. In questo modo si è realizzata la parete come da modello con PCM, senza intercapedine, analizzato con le elaborazioni numeriche. Durante l'applicazione degli strati aggiuntivi, alle interfacce, sono state installate sonde di temperatura e di flusso.

Il sistema di monitoraggio è stato completato inserendo sulla superficie interna della parete e in aria, sonde per la misura della temperatura superficiale e della temperatura interna dell'aria. Le sonde sono state collegate ad un data logger per la registrazione dei dati in continuo, mentre una centralina meteo ha permesso il contemporaneo rilievo dei dati climatici esterni quali temperatura dell'aria, irraggiamento solare, velocità e direzione del vento. Tutti i dati scaricati dai datalogger sono stati elaborati sotto forma di grafici.

I risultati dello studio tecnologico hanno mostrato come il pannello innovativo implementato con il PCM è risultato idoneo ad essere applicato all'involucro delle celle frigorifere determinando un miglioramento delle prestazioni energetiche. Le prove sperimentali alle quali sono stati sottoposti i prototipi hanno mostrato una buona resistenza del pannello alle sollecitazioni termiche e meccaniche assicurandone la compatibilità con la movimentazione sulla rete ferroviaria, considerando le azioni contemporanee di vibrazione e sollecitazione termica sotto le azione più drastiche dal punto di vista climatico. Ovviamente la produzione industriale, con l'uso delle tecnologie costruttive più accurate, ridurrà le imprecisioni dovute ad una costruzione artigianale, aumentando ulteriormente le caratteristiche prestazionali.

Comunque risultati dell'indagine teorica hanno mostrato come l'azione del materiale in passaggio di fase riesca a sfalsare temporalmente l'ingresso del calore nella cella frigorifera anche di un periodo di otto ore e ridurre il picco di carico termico delle ore diurne derivante dal contemporaneo contributo dell'azione del flusso solare e della differenza tra la temperatura dell'aria interna e quella esterna.

Dettagli sui risultati dell'attività svolta nel quadro della collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/075.

Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Il progetto affronta il tema dell'efficienza energetica degli edifici, tenendo presenti i programmi e le Direttive europee (come la 2010/31/UE, 2012/27/UE, ecc.) e gli impegni e gli obiettivi nazionali finalizzati a promuovere al massimo l'innovazione tecnologica, gli interventi di efficienza energetica negli edifici, pubblici e privati, il ricorso a procedure di finanziamento tramite terzi e l'utilizzo di finanziamenti europei e nazionali. In tal senso sono state sviluppate attività di ricerca tese a mettere a punto strumenti, criteri e soluzioni armonizzate e condivise sul tema specifico della efficienza energetica nel settore degli edifici, con particolare riferimento a quelli della Pubblica amministrazione (PA).

Il Decreto Legislativo 19 agosto 2005 n.192 e smi, per il recepimento della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, il DL 90/2013 per il recepimento della direttiva 2010/31/UE, il Dlgs 102/2014, di recepimento della Direttiva 2012/27/UE, il DLgs 104/2012, sul labelling dei prodotti e il DLgs 28/2011, rappresentano un significativo passo avanti del nostro Paese per una maggiore efficienza energetica degli edifici e la promozione delle fonti rinnovabili.

Il settore civile, in Italia rappresenta, oltre il 45% del fabbisogno energetico nazionale ed ha fatto registrare una costante crescita dei consumi. Una abitazione italiana esprime prestazioni energetiche molto basse facendo registrare dei consumi energetici annui medi, a livello nazionale, variazioni da 160 a 230 kWh m^2 anno, a fronte di consumi inferiori tra il 30-60% a livello UE. Un consumo così elevato di energia sta a significare un ampio potenziale di riduzione dei consumi energetici, tramite interventi di efficientamento degli edifici e, di conseguenza, significativi valori di riduzione delle emissione di gas climalteranti.

Al centro delle politiche vi è quindi il lancio di un ampio programma che consenta il superamento degli obiettivi europei al 2020 e il perseguimento di una leadership industriale per catturare la forte crescita internazionale attesa nel settore. Come riportato nella Strategia Energetica Nazionale (SEN), ci si propone di risparmiare ulteriori 20 Mtep di energia primaria al 2020, equivalente ad un risparmio di quasi il 25% rispetto allo scenario di riferimento europeo (superando così l'obiettivo del 20%), evitando l'emissione di circa 55 Mt di CO_2 l'anno e l'importazione di circa 8 miliardi di euro l'anno di combustibili fossili. In questo programma un ruolo importante è ricoperto dagli interventi di efficienza energetica negli edifici che diventa, pertanto, un obiettivo nazionale di primaria importanza, come evidenziato nella SEN. Un significativo contributo lo recitano le attività di R&S che sono in grado di fornire proposte e soluzioni ad alto valore aggiunto: un esempio, per gli edifici, è quello dell'Nearly Zero Energy Building visto non solo come un sistema edificio-impianto energeticamente efficiente, ma anche come un sistema ad alta integrazione in cui comfort, nuove tecnologie, qualità, sicurezza e fonti rinnovabili trovano il loro mix ottimale e, per complessi urbani, è quello della generazione distribuita, vista come mix di produzione energetica con l'utilizzo integrato di diverse tecnologie (PdC, solare termico, fotovoltaico, co-trigenerazione ecc.).

Le potenzialità degli interventi di efficientamento in Italia, molte dei quali con ritorno economico positivo, sono importanti, ma numerose barriere all'adozione - specifiche nei diversi settori di applicazione - ne impediscono la piena realizzazione. Gli sforzi per il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico saranno quindi orientati al superamento delle barriere all'applicazione di tecnologie per l'efficientamento, razionalizzando e rinforzando strumenti ed azioni dedicate a ciascun segmento e settore. In particolare si prevede:

- il rafforzamento di standard minimi e normative, in particolare per quanto riguarda l'edilizia ed il settore dei trasporti;
- l'estensione nel tempo delle detrazioni fiscali, prevalentemente dedicate al settore delle ristrutturazioni civili, che andranno aggiornate per renderle più efficaci ed efficienti in termini di costo/beneficio.

La Strategia Energetica Nazionale prevede:

- l'introduzione di incentivazione diretta per gli interventi della Pubblica Amministrazione, impossibilitata ad accedere al meccanismo delle detrazioni e che svolge un ruolo di esempio e guida per il resto dell'economia;
- Il rafforzamento degli obiettivi e dei meccanismi dei Certificati Bianchi, prevalentemente dedicati al settore industriale, che avranno un ruolo fondamentale data la rilevanza del settore e l'efficienza di costo che uno strumento di mercato come questo dovrebbe garantire.

Oltre agli strumenti citati, saranno inoltre determinanti alcuni fattori abilitanti quali il rafforzamento del modello ESCO, l'azione di controllo e enforcement delle misure, le azioni di comunicazione e sensibilizzazione, il miglioramento del sistema di monitoraggio e contabilizzazione dei risultati e il supporto alla ricerca e all'innovazione.

L'insieme delle misure citate vengono stimate in circa 15-20 miliardi di euro di supporto pubblico cumulato al 2020, in grado di stimolare 50-60 miliardi di euro di investimenti complessivi, con importanti ricadute su un settore industriale in cui si vuole puntare alla leadership internazionale e con un impatto di circa 8 miliardi di euro l'anno di risparmio di combustibile importato.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività sono state svolte in riferimento allo 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 particolare riferimento agli edifici della Pubblica Amministrazione. Si è tenuto in debito conto degli impegni assunti nel PAEE 2011, nella SEN e degli adempimenti che le nuove Direttive europee impongono agli Stati Membri, con un'attenzione alla direttiva 27/2012/UE, recepita con il Dlgs 102/2014, in cui viene data particolare considerazione agli edifici del settore pubblico, residenziali e non residenziali. Per questi si chiedono una serie di dati (caratterizzazione del parco immobiliare, consistenza della superficie utile, consumi energetici da bolletta ecc.) sui quali poter sviluppare misure e standard di intervento accompagnati da una diagnosi energetica e da una sensibilizzazione e formazione del personale tecnico delle PA.

Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di nuove tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore civile. 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.

L'obiettivo finale del progetto è quello di dare un significativo contributo al raggiungimento degli obiettivi europei e nazionali sull'efficienza energetica degli edifici e definire valori di benchmark e standard prestazionali a supporto della normativa e delle politiche energetiche: questo viene sviluppato tenendo conto delle esigenze del mercato e degli utenti finali nel rispetto dell'ambiente e con un uso razionale dell'energia.

Il progetto prevede i seguenti obiettivi:

- Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso, ufficio e scuole. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica
- Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni
- Proposta di applicazione dell'Indice di Severità Climatico per la zonizzazione estiva
- Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico
- Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (cool material)
- Piano integrato per l'informazione e la diffusione delle tecnologie verso i cittadini, le aziende e le pubbliche amministrazioni.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso, ufficio e scuole. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Il recente cambiamento del quadro normativo, europeo e nazionale sull'efficienza energetica comporterà una profonda revisione degli standard prestazionali e delle procedure da sviluppare in tale ambito. Il recepimento della direttiva recast 31/2010/UE e della 27/2012/UE non riguarda solo l'efficienza energetica degli edifici dal punto di vista tecnico e tecnologico, ma prevede lo sviluppo di modelli e strumenti per il finanziamento degli interventi e per la messa punto di contratti di Energy Performance Contract. I temi che saranno particolarmente affrontati sono quelli relativi alla realizzazione di edifici Nearly Energy Zero Building, per il nuovo e l'esistente da riqualificare, le disposizioni introdotte in materia di monitoraggio dei consumi degli edifici, l'applicazione della metodologia cost-optimal in fase di revisione, e che dovrà essere integrata da un'analisi di sensibilità sugli

standard prestazionali proposti in considerazione del fattore costo/beneficio, la messa a punto di strumenti e modelli per favorire gli interventi di riqualificazione negli edifici della PA, la realizzazione di un dimostratore, e la definizione di modelli di aggregazione della domanda rivolta, in modo particolare, alle PA di medie e piccole dimensioni. Una particolare attenzione dovrà essere stata posta all'integrazione delle fonti rinnovabili negli interventi di efficientamento energetico degli edifici.

a.1 Analisi e strumenti

Analisi critica dei dati sui consumi elettrici del terziario: gli edifici del Politecnico di Milano

L'analisi dei dati di assorbimento elettrico rilevati da diversi x-meters installati negli edifici del Politecnico di Milano (dati rilevati tramite un sistema di lettura remota) è stata condotta al fine di definire dei benchmark di reale consumo elettrico di edifici-tipo del terziario pubblico. La quantificazione degli indicatori di consumo (per m^2 e/o m^3) è stata possibile incrociando i dati elaborati sul lungo periodo (su base annuale o stagionale) con quelli geometrico-funzionali caratterizzanti gli edifici di pertinenza, desumibili tramite un apposito database dinamico contenente le informazioni sulla consistenza del parco edifici del Politecnico.

Rispetto alle analisi condotte nel precedente PAR, il lavoro in questa annualità ha consentito, da un lato, di proseguire con l'elaborazione dei dati relativi agli assorbimenti degli edifici del Campus Città Studi (e di verificarne, anche per confronto con il nuovo periodo temporale, la coerenza) e, dall'altro lato, di analizzare ed elaborare ulteriori dati di assorbimento facenti capo ai nuovi lettori installati negli edifici del Campus Bovisa.

I benchmark di consumo ottenuti, per diverse utenze elettriche e destinazioni d'uso dei relativi ambienti, sono stati organizzati in un foglio elettronico, tramite il quale è possibile filtrare categorie di dati analoghi per agevolarne il confronto diretto.

Inoltre, avvalendosi dei dati climatici registrati nel periodo gennaio 2012-agosto 2014 dalla stazione meteo del Politecnico, sono stati calcolati i Gradi Giorno delle diverse stagioni estive e a questi sono state correlate le variazioni dei consumi elettrici relativi ai carichi connessi ai sistemi di raffrescamento.

La metodologia di analisi ha comportato l'esportazione progressiva dei dati di assorbimento dal sistema di lettura remota, selezionandone la sorgente con cadenza oraria, e la trasposizione degli stessi in fogli elettronici. Con l'implementazione di apposite macro in fogli elettronici è stato possibile organizzare la mole di dati secondo diversi periodi temporali, nonché generare grafici rappresentativi delle letture per consentirne l'analisi critica.

Le analisi reiterate 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), ecc..

La successiva fase di elaborazione ha comportato, avvalendosi di un'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 elettriche (F1-F2-F3). Le analisi degli andamenti energetici rappresentati in istogrammi su base mensile, 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, con particolare riferimento a quelle connesse agli impianti di raffrescamento.

Le fasi di lavoro svolte possono riassumersi come segue:

- validazione e/o riassestamento delle ipotesi di allocazione degli assorbimenti relativi alle letture degli x-meters installati nel Campus Città Studi
- definizione di efficaci criteri di installazione degli x-meters ai fini delle logiche di audit
- lettura degli ulteriori dati desumibili dagli x-meters attivati nel corso del 2013 ed elaborazione dei dati di consumo a completamento di un'intera annualità
- lettura degli ulteriori dati desumibili dagli x-meters attivi dal 2012, analisi dei dati climatici registrati nel biennio 2012 - 2014 ed incrocio dei risultati
- lettura ed elaborazione dei nuovi dati di consumo relativi agli x-meters di recente installazione ed attivi dall'estate 2013 (Campus Bovisa)
- interrogazione del data-base dinamico contenente le informazioni di dettaglio del parco edifici al fine di associare i diversi consumi elettrici alle relative consistenze edilizie
- incrocio dei dati caratterizzanti gli edifici con i dati elettrici
- definizione degli indicatori di consumo/Benchmark per le diverse tipologie individuate

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto nell'ambito dell'accordo di collaborazione con il Politecnico di Milano Dipartimento ABC, è contenuta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/105.

Individuazione delle innovazioni ai fini del contenimento dei consumi elettrici e in generale dei consumi energetici degli edifici e dei costi dei nZEB da parte della Pubblica Amministrazione

Nello studio, condotto nel quadro della collaborazione con il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), sono stati analizzati, gli interventi che rientrano nel concetto di efficienza energetica degli edifici a partire dal fabbricato. La direttiva 2010/31/UE definisce "edificio ad energia quasi zero" un edificio ad altissima prestazione energetica con fabbisogno energetico nullo o comunque molto basso coperto in maniera significativa da energia da fonti rinnovabili. Partendo proprio da tale definizione la ricerca ha percorso in maniera lineare tutti quegli interventi che hanno l'obiettivo di minimizzare gli scambi termici del fabbricato con l'ambiente che lo circonda esponendo i pro e contro di ogni intervento edilizio.

In aggiunta la ricerca ha analizzato quei materiali e quelle tecnologie che, al momento, si stanno affacciando sul mercato ma che non sono ancora completamente affermate, anche a causa dell'elevato costo di produzione (ad esempio materiali isolanti particolarmente performanti che permettono di raggiungere, con spessori minimi, le prestazioni indicate nei nuovi standard legislativi).

In riferimento agli interventi sull'involucro che rientrano nel concetto di efficienza energetica, è stato calcolato l'indice "CCE - Costo dell'energia conservata" (o costo dell'energia risparmiata), in relazione a quelle stratigrafie tipiche di involucro diffuse sul territorio nazionale, per valutarne le diverse tipologie e lo spessore ottimale in funzione dei costi. Lo stesso esercizio è stato svolto con riferimento a due casi studio (edificio per uffici e edifici ad uso scolastico).

Il costo dell'Energia Conservata dipende prevalentemente dal costo relativo alle misure di efficienza energetica e dall'energia conservata (o risparmiata) dall'elemento edilizio. Questi due parametri sono quelli che giocano il ruolo principale nella sua definizione. Dall'applicazione della metodologia è emerso che:

- non tutti gli interventi sull'involucro sono convenienti da un punto di vista economico;
- la riqualificazione di tutti i componenti d'involucro per portare l'edificio a nZEB non sempre conduce a risultati positivi sul piano economico, nella riqualificazione energetica dell'edificio quindi l'utente finale dovrà operare delle scelte, oppure alcune tipologie di interventi dovranno essere incentivate.

Una descrizione dettagliata dei risultati del lavoro svolto è contenuta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/106.

Sviluppo ed aggiornamento della metodologia cost optimal per la valutazione della rispondenza degli standard energetici nazionali. Analisi di sensibilità della metodologia cost optimal per gli edifici residenziali ed a uso uffici

L'attività, svolta in collaborazione con il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, riguarda lo sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici.

La Direttiva 2010/31/UE, nota come EPBD recast (Revisione della Energy Performance of Buildings Directive), definisce i principi relativi al miglioramento della prestazione energetica degli edifici. Questa 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 è demandata la determinazione della durata del ciclo di vita economico dell'intero edificio o degli elementi considerati nelle valutazioni.

Nel marzo 2012 la Commissione ha pubblicato il Regolamento delegato (UE) N. 244/2012 del 16 gennaio 2012, e a seguire, le Linee guida (Orientamenti della Commissione) che accompagnano il suddetto Regolamento. 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 in questo 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.

Per l'applicazione della suddetta metodologia, nell'ambito del precedente Accordo di Programma [rapporto RdS/2013/144] è stato definito un pacchetto integrato costituito da fogli di calcolo in formato Excel user friendly in grado, per ogni caso studio considerato, di fornire la migliore soluzione tecnologica in termini di costi/benefici finalizzata alla riduzione dei consumi energetici, sia per edifici di nuova costruzione, sia per edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione totale.

Il processo di ottimizzazione considera i consumi annuali per riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria, raffrescamento ed illuminazione (nel caso di edifici non residenziali) dell'edificio, 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).

Tale strumento di calcolo, già applicato ad una serie di casi studio nell'ambito della precedente attività, è stato aggiornato secondo le attuali specifiche tecniche UNI/TS 11300 e applicato nuovamente ad edifici campione. Tra i casi studio sono stati aggiunti degli edifici di nuova costruzione e differente tipologia (monofamiliare, piccolo e grande condominio) e destinazione d'uso (residenze, uffici), per le città di Milano e di Palermo, prese come caratteristiche delle zone climatiche E e B.

È stata quindi fatta un'analisi di sensibilità, per singolo edificio, a partire dal pacchetto di misure di efficienza energetica ottimale ottenuti dal processo cost optimality, si è fatto variare il livello di prestazione EEL per singola misura di riqualificazione EEM e si sono riportati i risultati in termini di energia primaria suddivisa in usi finali (riscaldamento, ACS, raffrescamento e illuminazione per gli uffici) e costo globale suddiviso per singole voci (investimento iniziale, manutenzione, energia). Lo scopo è verificare in termini di costi/benefici lo scostamento dal valore ottimale al variare del livello di efficienza energetica del singolo intervento di riqualificazione.

Un'altra fase di studio ha riguardato la valutazione del livello ottimale di costo per alcuni edifici campione. In accordo con quanto specificato dalla Direttiva e dal Regolamento delegato, la metodologia cost optimal è stata applicata anche a singoli interventi, emulando la casistica di edifici esistenti sui quali si desidera intervenire con interventi puntuali di riqualificazione energetica.

Per finire è stata effettuata una simulazione dinamica come strumento alternativo alla metodologia quasi-stazionaria delle specifiche tecniche UNI/TS 11300, volta alla definizione dei consumi energetici in previsione della valutazione del livello ottimale in funzione dei costi, così come definito dalla metodologia cost optimal. Lo scopo è stato quello di verificare l'eventuale deviazione tra il modello semplificato UNI/TS 11300 ed il modello dinamico nell'individuazione delle soluzioni ottimali.

L'attività svolta e i risultati ottenuti nel quadro della collaborazione con il Politecnico di Torino sono dettagliati nel rapporto RdS/PAR2013/107 e relativi allegati.

Analisi dell'influenza del comportamento dell'utenza sui consumi energetici finali degli edifici: fattori influenzanti, modelli probabilistici per la simulazione degli occupanti e profili comportamentali tipo

Il lavoro riguarda le attività relative all'Annex 66 "*Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*" dell'International Energy Agency, iniziato con riunioni preliminari nel 2014 e che avrà termine nel 2017. Il gruppo TEBE (Technology Energy Building Environment) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino ha partecipato in modo propositivo fin da subito allo sviluppo delle attività dell'Annesso.

In generale, lo scopo dell'attività è l'approfondimento dei metodi di modellazione e implementazione del comportamento dell'utenza per ottenere una previsione dei consumi totali e degli usi finali di energia negli edifici più accurata e realistica. A questo si affianca la raccolta e l'analisi critica di esperienze significative per una migliore comprensione del comportamento energetico reale degli edifici.

L'analisi del comportamento dell'utenza è svolta quindi sia con modelli predittivi diretti che indiretti, al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure, tecniche e politiche di risparmio energetico applicate a diverse scale di studio, dalla scala del singolo edificio fino a quella grande campione edilizio, sia negli edifici residenziali sia negli edifici adibiti ad uffici. Lo studio è rivolto inoltre alla definizione di un modello analitico per la caratterizzazione degli usi finali dell'energia e la sua validazione.

L'attività condotta dal Politecnico di Torino sul tema definizione della valutazione sui consumi energetici dei comportamenti dell'utenza, si è delineata mediante uno studio teorico ed empirico sull'incertezza della valutazione del consumo energetico dovuta al comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare e simulare il comportamento dell'utente nel contesto dei consumi energetici reali e applicata a casi di studio. La metodologia si delinea con uno

spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell'ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l'edificio e i sistemi.

Nello specifico la procedura proposta è stata applicata a dei casi di studio: vengono definiti dei modelli di comportamento degli occupanti relativi all'uso delle finestre e all'uso del termostato in ambito residenziale e in edifici adibiti a terziario. In parallelo è stata indagata l'influenza di differenti livelli d'interazione con i principali sistemi di controllo delle condizioni climatiche e ambientali a disposizione degli utenti, sul livello di comfort termico e dunque sui consumi energetici per il riscaldamento. Profili comportamentali per utenti Attivi, Medi, Passivi sono stati implementati secondo passaggi logici incrementali al fine di ottenere la più accurata riproduzione possibile dell'interazione dell'utente con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio. Seguendo tale approccio, la ricerca ha evidenziato quale combinazione di profilo comportamentale di utente sia il più "energy-waster" o "energy-saver" nell'ambito degli edifici residenziali.

L'attività svolta è dettagliata nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/108.

Materiali e sistemi innovativi per l'involucro edilizio opaco: abaco di soluzioni, modelli per la simulazione termoenergetica e metodi di analisi sperimentale

Il lavoro riguarda le attività sviluppate all'interno delle linee dell'Annex 65 *"Long Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems*". I temi trattati riguardano l'utilizzo di materiali innovativi super isolanti in applicazioni edili. Particolare enfasi viene data all'analisi delle prestazioni di questi sistemi sul lungo periodo ed alle problematiche di utilizzo di tali componenti all'interno di sistemi per l'involucro ed i sistemi edilizi.

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata, sino ad ora lungo due direttive. Un primo contributo si è avuto attraverso la partecipazione attiva alle riunioni preliminari (Zurigo, settembre 2013) ed alla successiva fase preparatoria per la definizione dei contenuti della ricerca. Parallelamente è stata avviata una attività di ricerca teorico sperimentale mirata a:

- verificare le procedure di test sperimentale delle prestazioni termoenergetiche dei VIP (Vacuum Insulation Panels);
- valutare le prestazioni termoenergetiche dei VIP (Vacuum Insulation Panels) a livello di applicazione edile (componente), evidenziando la perdita di efficienza (rispetto al solo materiale) legata alle tecniche costruttive ed alla presenza (inevitabile) di ponti termici);
- mettere a punto dei protocolli di valutazione teorico-sperimentale delle prestazioni in opera di componenti edili che utilizzino materiali super-isolanti;
- ideare e testare dei "pacchetti" parietali ottimizzati per l'impiego di VIP;
- analizzare la possibilità di accoppiare i pannelli superisolanti VIP con altri materiali innovativi (quali ad esempio i materiali cambiamento di fase e/o gli aerogel) per realizzare sistemi di facciata innovativi ad alta prestazioni, adatti sia per le nuove costruzioni che per il retrofit energetico degli edifici esistenti.

Poiché la fase operativa dell'Annex 65 inizierà nel corso del Settembre 2014, al momento della chiusura della presente annualità non erano disponibili risultati definitivi relativi a questa attività. Una prima serie di risultati preliminari è stata tuttavia pubblicata sugli atti del convegno "Sustainability in Energy and Buildings", SEB-14, tenutosi a Cardiff nel luglio 2014, in cui è stata presentata una relazione dal titolo "The effect of different materials joint in Vacuum Insulation Panels" [rapporto RdS/PAR2013/109].

Sistemi impiantistici ad alta efficienza energetica operanti con basse differenze di temperatura: abaco delle soluzioni, metodi di dimensionamento e nuove tecnologie

Il lavoro riguarda le attività dell'Annex 59 "*High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings*" iniziato nel corso dell'anno 2012 ed incentrato su metodologie di analisi e soluzioni tecniche per evitare o ridurre le perdite dovute alle differenze di temperatura nei diversi processi coinvolti nella climatizzazione di un ambiente chiuso. Infatti, precedenti progetti ECBCS come l'Annex 37 o l'Annex 49 hanno messo in evidenza come l'aumento dell'efficienza exergetica venga ottenuto tramite una riduzione della differenza fra la temperatura dell'ambiente interno e quella del fluido operativo in uscita dalla centrale termica (tipicamente aria e/o acqua). Le perdite dovute a questa differenza di temperatura possono essere classificate come: (1) perdite per scambio di calore e di massa (umidità), (2) perdite per trasmissione di calore durante la circolazione del fluido operativo e (3) perdite nei terminali che scambiano calore (rilascio o assorbimento) con l'ambiente interno.

Pertanto, la riduzione della differenza di temperatura a cui viene scambiato il calore e la rimozione o riduzione degli scambi termici non strettamente necessari al condizionamento dell'ambiente interno sono la chiave per la realizzazione di sistemi HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) più efficienti.

Dal punto di vista tecnologico, quest'obiettivo può essere raggiunto tramite l'adozione di terminali appropriati integrati nel sistema HVAC. Dal punto di vista progettuale, invece, è necessario modellizzare in maniera accurata lo scambio termico fra i terminali e l'ambiente interno, al fine di ottenere un dimensionamento accurato (e non solo "cautelativo") del sistema e una riduzione consistente degli scambi termici inefficaci.

L'attività del Politecnico di Torino all'interno della Subtask A dell'Annex 59 ha riguardato le operazioni per la definizione e calibrazione di un edificio di riferimento da adottare all'interno dell'Annex per la valutazione di nuove soluzioni impiantistiche. L'attività è stata svolta in due fasi distinte. La prima fase, che ha riguardato la definizione del modello energetico dell'edificio di riferimento (un edificio per uffici di medie dimensioni) all'interno del programma di simulazione dinamica EnergyPlus, è stata conclusa. Lo scopo della creazione di tale modello è stato l'utilizzo dello stesso per la definizione di un sistema impiantistico di riferimento da mettere a confronto con soluzioni impiantistiche differenti. La seconda fase dell'attività, attualmente in corso, è finalizzata alla definizione del sistema impiantistico di riferimento da applicare al modello stesso dell'edificio.

L'attività svolta all'interno della Subtask D dell'Annex 59 è stata legata allo studio di sistemi solari termici a bassa temperatura. Lo studio si è focalizzato sulla riduzione dei livelli termici sia nell'accumulo che nel circuito primario del solare termico. In particolare, si è approfondito l'uso di materiali a cambiamento di fase e dei possibili benefici derivanti dallo sfruttamento del calore latente. La prima fase dell'attività è consistita nella ricerca bibliografica sulla letteratura esistente in materia e nella costruzione di un valido modello teorico di descrizione in grado di descrivere un sistema solare termico alimentato a PCM fluidizzati.

La seconda fase della ricerca ha visto una notevole attività di sperimentazione in laboratorio delle proprietà termofisiche dei materiali in questione e la realizzazione di un prototipo in scala reale di un sistema solare termico innovativo (Figura 418). L'ultima fase, ancora in corso di realizzazione, prevede il monitoraggio in continuo di tale sistema ed il confronto, in termini di rendimento medio stagionale, con le tecnologie attualmente presenti sul mercato.



Figura 418. Dimostratore in scala reale installato sul tetto del Politecnico di Torino

Le attività svolte ed i risultati ottenuti sono dettagliati nel rapporto RdS/PAR2013/110.

Analisi sistematica della sostenibilità economica nell'adozione di soluzioni per l'efficienza energetica negli edifici della Pubblica Amministrazione (PA) in Italia, con particolare riferimento al comparto delle Amministrazioni Pubbliche Locali

L'obiettivo dell'attività svolta dal Politecnico di Milano è stato quello di analizzare il profilo di sostenibilità economica dell'adozione delle soluzioni di efficienza energetica negli edifici della PA italiana, con particolare attenzione al caso dei Comuni. Inoltre, si è inteso fornire una quantificazione dei benefici potenziali conseguibili attraverso una capillare diffusione delle soluzioni di efficienza energetica in questo specifico ambito di applicazione, in termini di risparmi energetici ottenibili, conseguenti risparmi sulla bolletta energetica del Paese, benefici ambientali ed, infine, in termini di ricadute economiche ed industriali sul sistema paese.

Lo studio si articola in diverse fasi. La prima concerne la definizione delle tecnologie applicabili alla realizzazione di interventi di efficienza energetica negli edifici della PA. Le principali tecnologie considerate nello studio sono state: caldaie a condensazione (consentono rispetto alla caldaia tradizionale di sfruttare buona parte del calore latente contenuto nei gas di scarico), pompe di calore (sistemi che trasferiscono calore da un corpo a temperatura più bassa ad un corpo a temperatura più alta), sistemi di controllo solare (vetri che consentono di ridurre l'apporto di calore solare), impianti solari termici (in cui la radiazione solare è utilizzata per la produzione di calore), impianti di *solar cooling* (permettono di produrre freddo sotto forma di acqua refrigerata a partire da una sorgente di calore), sistemi di *building automation* (attraverso cui è massimizzata l'efficienza energetica degli impianti di un edificio, sulla base del livello di utilizzo del medesimo edificio e delle condizioni ambientali esterne), micro-cogenerazione (integrano o sostituiscono le caldaie per il riscaldamento e soddisfano in tutto o in parte le necessità di autoconsumo elettrico), trigenerazione (oltre all'autoproduzione di energia elettrica, consente di utilizzare

l'energia termica recuperata anche per produrre acqua refrigerata), sistemi di accumulo dell'energia termica (permettono l'accumulo dell'energia quando possibile e l'utilizzo della stessa quando necessario), *smart metering* (consente di misurare l'efficacia dell'intervento di efficienza energetica, è infatti lo strumento impiegato per la misurazione dei risparmi conseguiti a seguito di interventi di efficientamento) e gli impianti di illuminazione efficienti (tra cui le lampade tradizionali ad alta efficienza ed i LED). Le caratteristiche peculiari e le principali prestazioni energetiche ed economiche di ogni soluzione considerata sono state ricostruite e validate attraverso interviste dirette rivolte ai principali operatori attivi nel settore dell'efficienza energetica e ad una esaustiva ricerca condotta sulla documentazione tecnica disponibile.

In una seconda fase si è proceduto a segmentare l'insieme degli ambiti di applicazione di interesse, distinguendo tra diverse tipologie di edifici della PA da sottoporre ad indagine, tra cui scuole, uffici, impianti sportivi e social housing. Ciò consente di avere la fotografia della situazione attuale in termini di efficienza energetica nella Pubblica Amministrazione Locale e di comprendere se vi sono ambiti di applicazione critici per inefficienze energetiche o per entità dei consumi complessivi.

In seguito sono stati utilizzati i dati reperiti in precedenza per valutare la sostenibilità economica delle diverse tecnologie in diversi ambiti d'applicazione. A tal fine si utilizzano vari indicatori quali il costo medio dell'energia elettrica e termica auto-prodotta o risparmiata lungo la vita utile dell'impianto, l'entità dell'energia risparmiata e dell'emissione di CO_{2eq} evitata, il tempo di *pay-back* attualizzato e il valore attualizzato netto dell'investimento. Un'analisi che, quindi, non si limita solo a valutare la prospettiva economica. Inoltre al fine di dare solidità ai risultati ottenuti in termini di redditività o meno degli investimenti, è stata condotta un'analisi di sensibilità corrispondente a diversi livelli delle variabili di input ed ambientali (tra cui, ad esempio, il prezzo di acquisto dell'energia elettrica dalla rete). Tra queste, un'attenzione particolare è posta sulla struttura incentivante. Sono quindi proposti sia scenari in cui avviene il ricorso ai meccanismi di incentivazione attualmente disponibili in Italia per la Pubblica Amministrazione (quali ad esempio il Conto Energia Termico ed i Titoli di Efficienza Energetica), sia scenari in cui vi è l'assenza di incentivi. In questo modo è possibile evidenziare il contributo alla sostenibilità economica, associata all'adozione delle tecnologie per l'efficienza energetica, derivante dalla presenza di incentivi *ad hoc*.

A completamento dell'analisi di sostenibilità sono stati analizzati dei casi di studio paradigmatici di adozione delle soluzioni per l'efficienza energetica in edifici della PA, con l'obiettivo di illustrare in contesti concreti i ritorni e i benefici associati all'impiego di questi sistemi. I casi di studio si sviluppano lungo tre direzioni:

- sostituzione "forzata" a fine vita della tecnologia oppure "volontaria" ossia quando la tecnologia è ancora funzionante;
- applicazione di un'unica tecnologia oppure di un mix di esse;
- illustrazione ed analisi dell'impatto delle variabili critiche (incentivi, costo di investimento, prezzo dell'energia elettrica).

Infine sono stati valutati i benefici potenziali, da un punto di vista economico, energetico ed ambientale, per il sistema complessivo della PA in Italia associati ad una diffusione su larga scala delle soluzioni di efficienza energetica considerate. Si stima che, dal punto di vista teorico, la massima diffusione delle soluzioni per l'efficienza energetica esaminate in questo studio possa determinare una riduzione di circa il 17% della bolletta elettrica e di circa il 57% della bolletta termica della PA italiana, per un risparmio complessivo di circa 2.000 milioni di €/anno. Considerando invece un verosimile grado di penetrazione delle soluzioni per l'efficienza energetica, valutato in funzione della convenienza economica, del grado di maturità tecnologica e della percezione sia dei potenziale soggetti investitori che degli operatori del mercato, la riduzione della bolletta elettrica si attesterebbe a circa il 10%, mentre la riduzione della bolletta termica sarebbe di circa il 26%, con un risparmio complessivo di circa 900 milioni di €/anno.
I risultati della ricerca sono presentati in un formato pensato per consentire ai decisori e funzionari operanti nelle Amministrazioni Pubbliche Locali di disporre di uno strumento pratico in grado di orientarli nei progetti di efficienza energetica su cui saranno coinvolti nel prossimo futuro. In particolare, lo studio mette i destinatari della ricerca nelle condizioni di valutare il mix di tecnologie e soluzioni ottimali da adottare in diversi ambiti d'applicazione e di stimarne con precisione le ricadute economiche ed ambientali, presupposto fondamentale per l'avvio di un efficace progetto di efficienza energetica.

Lo studio si basa su una metodologia mista, che combina interviste dirette a *key informants*, simulazioni, analisi di scenario e what-if, consultazione di basi di dati pubbliche o ad accesso riservato, desk research sulla documentazione tecnica riguardante le soluzioni per l'efficienza energetica.

In conclusione, l'analisi condotta mostra come, ad oggi, esistono due famiglie di tecnologie che raggiungono la convenienza economica nella maggior parte degli ambiti d'applicazione considerati in questo studio. Si tratta

innanzitutto dei sistemi di illuminazione efficiente, che riescono a garantire, in ogni ambito di applicazione considerato, un notevole risparmio di energia elettrica (mediamente superiore al 50%) a fronte di un investimento ridotto, se confrontato con il costo necessario per adottare le altre tecnologie contemplate nello studio. In secondo luogo, paiono estremamente efficienti i sistemi di Building Automation la cui adozione, grazie al risparmio di energia elettrica e termica risultante una gestione automatizzata delle utenze dell'edificio, è conveniente in tutti gli ambiti della PA considerati, ad eccezione degli uffici pubblici.

Altre soluzioni tecnologiche risultano invece economicamente sostenibili per l'investitore solo in alcuni casi specifici, ossia quando si presentano condizioni di utilizzo e di consumo energetico particolari. Le pompe di calore risultano ad esempio convenienti solo nel comparto degli ospedali e degli uffici comunali, in cui il risparmio conseguibile anche dalla generazione di energia per finalità di raffrescamento, unita a quella per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, giustifica l'investimento maggiore rispetto a sistemi tradizionali. La cogenerazione, invece, risulta ampiamente conveniente solo in ospedali e impianti sportivi, ossia in ambiti d'applicazione caratterizzati da un consumo termico elevato.

Un importante messaggio che emerge da questo studio riguarda gli effetti dei sistemi di incentivazione attualmente vigenti sulla convenienza economica delle differenti soluzioni per l'efficienza energetica. Appare evidente come l'impatto dei regimi incentivanti sul ritorno degli investimenti in efficienza energetica negli ambiti della PA considerati sia, nella maggior parte dei casi, non sufficiente a far raggiungere la convenienza economica a quelle tecnologie che di per sé non lo sono. In particolare, solo nel caso di un investimento "forzato" in un impianto a caldaia a condensazione installata in un'unità abitativa pubblica, il beneficio derivante dall'ottenimento di Titoli di Efficienza Energetica garantisce un ritorno economico accettabile per l'investitore. Se per la maggior parte delle soluzioni gli incentivi vigenti non forniscono un beneficio tale da determinarne la sostenibilità economica, è altrettanto indiscutibile che nei casi esaminati essi migliorano i ritorni economici di soluzioni che di per sé sono già convenienti, sistemi di illuminazione efficienti ed impianti di Building Automation su tutte.

Appare dunque evidente come ancor oggi la sostenibilità economica delle soluzioni per l'efficienza energetica nella PA rappresenti una barriera per la loro diffusione. Per superare tale ostacolo, una possibile strada potrebbe consistere in una parziale revisione dei meccanismi di incentivazione. Da un lato, infatti, occorrerebbe definire sistemi di incentivazione che tengano conto delle caratteristiche peculiari di ogni possibile soluzione utilizzabile per fare efficienza negli edifici pubblici. Dall'altro lato, inoltre, sarebbe necessario valutare le caratteristiche dell'edificio a cui sono applicate le soluzioni per l'efficienza energetica ed in particolare i consumi di elettricità e calore, le destinazioni d'utilizzo dell'energia e quanto è efficiente energeticamente l'edificio. Questi fattori hanno infatti un peso determinante nell'influenzare la convenienza economica derivante dall'adozione di una tecnologia energeticamente efficiente. Inoltre, esistono degli spazi per ridurre la dispersione degli sforzi del legislatore, dato che esistono alcune soluzioni tecnologiche di per sé convenienti che vengono comunque incentivate e dato che i campi di applicazione dei tre meccanismi di incentivazione oggi disponibili siano in parte sovrapposti.

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto è contenuta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/111.

Sviluppo del SW SEAS per le diagnosi energetiche di ambienti ospedalieri dedicati alla degenza e corsi informativi/ formativi del tool informatico semplificato per le diagnosi energetiche degli edifici

Il contesto di ricerca in cui l'accordo di collaborazione tra ENEA e l'Università di Pisa agisce è quello che ha visto, nelle annualità precedenti, lo sviluppo del software SEAS (Software Energetico per Audit Semplificati, dotato di interfaccia grafica) con l'obiettivo di mettere a disposizione degli utenti del settore uno strumento per eseguire diagnosi energetiche di edifici esistenti, individuando le criticità del sistema edificio-impianto analizzato e fornendo la possibilità di individuare le strategie e gli interventi più utili per ridurre le richieste di energia.

La presente attività consiste in un upgrade del software SEAS 2.0, realizzato in precedenza [PAR 2011 RdS/2012/110, PAR 2012 RdS/2013/143], che offriva la possibilità di condurre diagnosi energetiche per edifici di tipo residenziale, scuole e uffici, dotati di impianti idronici per i soli servizi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria. Come nelle routine precedentemente implementate, anche in questo caso si è fatto riferimento per le procedure di calcolo alle UNI/TS 11300, allo stato attuale di revisione.

Al termine dell'attività, col supporto di ENEA, si è organizzato un seminario rivolto a tutti gli operatori interessati del settore pubblico e privato, per presentare il software SEAS 3 e spiegarne le logiche e le potenzialità.

Nell'ambito dell'accordo di collaborazione si è proceduto all'upgrade del software alla nuova versione SEAS 3, in cui sono state implementate le seguenti modifiche:

- possibilità di eseguire procedure di diagnosi energetica anche per edifici adibiti ad attività ospedaliera,

limitatamente ai locali considerati non severi; a tal proposito, si sottolinea che - data la complessità di questi edifici - è stata esclusa la possibilità di svolgere diagnosi con SEAS 3 di ambienti quali sale operatorie, reparti infettivi, camere bianche e, più in generale, stanze associate a terapie che richiedano caratteristiche termo-igrometriche stringenti o che utilizzino macchinari non comuni; pertanto, è possibile utilizzare SEAS 3 per le seguenti sottozone: camere di degenza e di day-hospital, corsie, sale mediche e soggiorni;

- possibilità di utilizzare SEAS per la diagnosi energetica di edifici dotati di impianti misti aria-acqua (aria primaria).

In particolare, l'implementazione nel software della destinazione d'uso ospedaliera ha comportato un'estensione delle opzioni relative al consumo di acqua calda sanitaria, recependo le stime indicate nell'ultima revisione della normativa UNI/TS 11300-2, ma legando il dato specifico non tanto alla capacità di ospitalità della struttura, quanto piuttosto ai profili di utilizzo reali, già presenti come dato di input nel software. Per quanto riguarda i consumi dei principali macchinari elettrici utilizzati in queste strutture, essi possono essere inseriti nel panel di zona dedicato agli usi elettrici.

Sempre nell'ambito dell'accordo, si è sviluppata una routine in ambiente MATLAB, con opportuna interfaccia grafica, per la simulazione del fabbisogno di energia termica ed elettrica per il servizio di aria primaria negli edifici. Tale routine prevede, secondo un proprio motore di calcolo, il trattamento di alcuni risultati intermedi derivanti dai panel di zona di SEAS (dati di input), per ottenere il fabbisogno di energia elettrica e termica per il servizio di aria primaria. Questi risultati, reimportati in SEAS, costituiscono un carico aggiuntivo per il sottosistema di generazione. Lo schema generale di calcolo per aria primaria è riportato in Figura 419. All'interno delle schede di calcolo relative all'impianto di generazione per aria primaria, nel caso di impianto idronico centralizzato, a servizio di più Unità di Trattamento Aria (UTA), si utilizza la logica della ripartizione millesimale, con inserimento e criteri di ripartizione affidati all'auditor. Nel caso in cui il sistema di generazione serva sia l'impianto di riscaldamento sia quello di aria primaria, il carico termico della UTA viene considerato come quello di un terminale aggiuntivo.

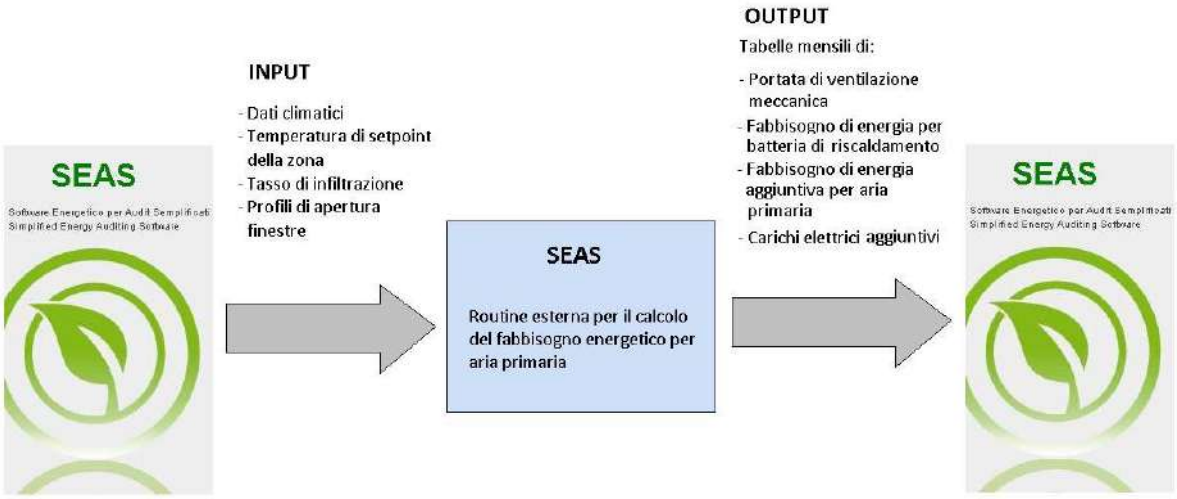


Figura 419. Schema di calcolo per il servizio dii aria primaria negli edifici

Si è quindi proceduto ad un'organizzazione della routine e dell'interfaccia dedicate alla ventilazione meccanica, differenziando il calcolo in funzione dei dati conosciuti dall'auditor. Si è prevista la possibilità di creare sottozone, internamente alla zona termica simulata, al fine di includere locali con destinazioni o modalità d'uso diverse, ma tali da non implicare la creazione di altrettante zone differenziate (un caso tipico è quello di una scuola in cui si hanno anche alcuni uffici dedicati al personale docente). È possibile inserire come input la portata di ventilazione meccanica di progetto, nel caso essa sia nota, ma è anche prevista la possibilità di calcolarla secondo lo standard normativo in vigore (UNI 10339). Si tiene conto di eventuali portate di ventilazione per apertura infissi, nel solo caso in cui il profilo di apertura abbia un carattere continuativo durante le ore di occupazione dei locali. Per quanto riguarda le infiltrazioni attraverso i serramenti, esse si trattano in modo analogo alla versione precedente del software. La procedura esegue tutti i calcoli su base bioraria per i giorni medi mensili, differenziando i giorni lavorativi dai festivi. Infine, come ultima operazione di calcolo, i dati sono aggregati su base mensile e attribuiti alla zona, così come definita in SEAS.

È possibile simulare sia impianti ad aria neutra, ovvero quelli in cui il fabbisogno termico sensibile sia totalmente ed esclusivamente coperto dall'impianto di riscaldamento, sia impianti in cui l'aria di immissione non è alla

temperatura di set-point (ad esempio gli impianti di sola ventilazione meccanica), quindi in cui si modifica il bilancio sensibile della zona.

Sono state implementate le tipologie di impianto e di controllo più frequenti: ventilatori a potenza e portate fisse o variabili (in modo discreto, con orologi di controllo o a gradini, o continuo, con inverter, saracinesche di regolazione o sistemi by-pass); impianti con batterie di riscaldamento e impianti di sola ventilazione meccanica con aria esterna ed eventuale recuperatore; controlli sulla temperatura d'immissione e sull'umidità relativa degli ambienti. Il controllo delle condizioni di immissione può essere attuato tramite valvole a 3 vie (deviatrici o miscelatrici) sul circuito idronico a servizio delle batterie di pre-riscaldamento e post-riscaldamento (se presente). A livello di ciascuna sottozona, il controllo della portata di ventilazione può essere comandato dalla presenza degli utenti (nota attraverso profili biorari dei giorni lavorativi e festivi) o in funzione di parametri monitorati di qualità dell'aria: con sensore di umidità relativa, che prevede l'esecuzione del bilancio igrometrico della sottozona, o con sensore del livello di biossido di carbonio, che indirettamente implica l'effettuazione dei ricambi igienici per persona suggeriti dalla UNI 10339. Nel caso di canali con doppio flusso (in immissione e in estrazione), è previsto l'inserimento di un recuperatore di calore con efficienza variabile in funzione della portata (ottenibile tramite interpolazione od opportuna estrapolazione di dati tecnici forniti dal costruttore).

Al fine di aiutare l'utente nella comprensione dell'impianto esistente e nella schematizzazione dello stesso, è visualizzato, direttamente sull'interfaccia grafica, lo schema impiantistico con i possibili componenti (ventilatore, batterie di riscaldamento, umidificatore e recuperatore di calore). Gli schemi impiantistici previsti sono:

- ventilatore singolo (impianto di ventilazione meccanica senza trattamento dell'aria o recupero termico);
- ventilatore singolo con batteria di riscaldamento;
- ventilatore singolo con batteria di riscaldamento e umidificatore;
- ventilatore doppio (in mandata e in ripresa);
- ventilatore doppio con recuperatore di calore;
- ventilatore doppio con batteria di riscaldamento;
- ventilatore doppio con recuperatore di calore e batteria di riscaldamento;
- ventilatore doppio con batteria di pre-riscaldamento, umidificatore e batteria di post-riscaldamento;
- ventilatore doppio con recuperatore di calore, batteria di pre-riscaldamento, umidificatore e batteria di post-riscaldamento.

L'attività è illustrta nei dettagli nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/113.

Applicazione della metodologia comparativa di cui all'articolo 5 della direttiva 2010/31/UE, a tipologie di edifici esistenti soggetti a ristrutturazione e riqualificazione energetica, con adattamento al contesto italiano.

Oggetto dello studio, eseguito nel quadro della collaborazione con il Dipartimento Energia del Politecnico di Milano, è l'applicazione della metodologia comparativa di cui all'articolo 5 della Direttiva 2010/31/UE, a tipologie di edifici esistenti soggetti a ristrutturazione e riqualificazione energetica, con adattamento al contesto italiano.

Sono state valutate possibili strategie e requisiti per edifici a energia quasi zero nelle ristrutturazioni edilizie nel settore terziario e scolastico, considerando due tipologie di interesse sia per il settore privato sia per quello pubblico, quali un edificio per uffici e un edificio scolastico, in due contesti climatici italiani (Roma e Milano).

Il lavoro di ricerca si è sviluppato nelle seguenti attività:

- elaborazione dei risultati di simulazioni energetiche dei due modelli di edificio con varianti di involucro edilizio per la determinazione dei rispettivi *energy needs* per riscaldamento, raffrescamento ed *energy use* per illuminazione, nei due contesti climatici considerati;
- elaborazione di curve *energia primaria netta/costi globali sul ciclo di vit*a con riferimento alla metodologia comparativa (*metodologia cost-optimal*) per mezzo di strumento di calcolo sviluppato presso il Politecnico di Milano;
- valutazione di possibili strategie e requisiti per edifici a energia quasi zero nelle ristrutturazioni edilizie nel settore terziario e scolastico;
- commenti alla metodologia comparativa adottata con adattamento al contesto italiano.

Dai risultati in generale si può osservare che la zona nell'intorno dei valori minimi di energia primaria (netta) - in cui potrebbe essere individuato l'obiettivo di *energia quasi zero* - è caratterizzata da interventi di efficienza energetica e sistemi a fonti rinnovabili con prestazione medie-alte e alte, che compaiono con maggior frequenza in questa area delle nuvole costi/energia dei diversi climi e destinazioni d'uso.

Nelle zone di minimo costo globale - *cost-optimal* - e soluzioni tecnologiche e le prestazioni rilevate appaiono più eterogenee. In generale questa zona è caratterizzata da strategie di involucro di prestazioni energetiche di livello medio e medio/alto, probabilmente dovuto a un maggior equilibrio fra entità dell'investimento inziale e riduzione dei costi grazie ai risparmi di energia.

L'attività svolta e risultati ottenuti sono descritti nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/114.

a.2 Caratterizzazione edifici

Ricerca sul territorio nazionale per determinare la consistenza e la caratterizzazione del parco edifici riferiti agli ospedali del settore pubblico

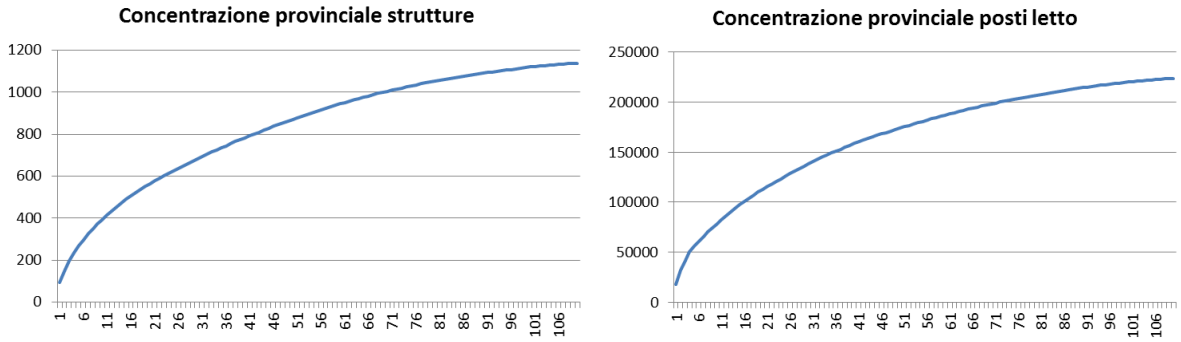
Il CRESME ha proseguito le indagini per la definizione del parco immobiliare pubblico nazionale occupandosi del settore ospedaliero e dei relativi consumi energetici. L'indagine è volta a definire la consistenza numerica e le caratteristiche tipologiche ed impiantistiche degli edifici ad uso ospedaliero.

La consistenza complessiva delle strutture sanitarie in Italia è di 1.137 unità e comprende 505 strutture private accreditate al Servizio Sanitario Nazionale. L'universo di riferimento dell'indagine del CRESME è costituito dalle 632 strutture sanitarie pubbliche o ad esse assimilabili esistenti al 2013 sul territorio italiano.

Tra le 12 tipologie di strutture sanitarie l'indagine non contempla le sole strutture private accreditate[26]. Il numero di posti letto complessivi in Italia è pari a 223.274 di cui circa 117 mila in strutture pubbliche o assimilabili e 106 mila in strutture private accreditate. I posti letto "ordinari" (al netto di quelli in day hospital e in day surgery) è di quasi 200 mila unità, di cui 105 mila pubblici o assimilabili e 94 mila in strutture private accreditate.

La distribuzione sul territorio delle strutture (Figura 420) vede il 20,8% delle strutture concentrate in sole 4 province (Roma, Milano, Napoli, Torino); il 50,8% in 21 province e il 75,0% in 48 province. Il numero di posti letto si concentra per il 22,8% in 4 province (le stesse già viste riguardo alle strutture); per il 50,5% in 20 province e per il 75,3% in 46 province.

In termini di posti letto pro capite, si rileva un'estrema variabilità sul territorio; si va dal minimo di 0,6 p.l. per 1.000 abitanti a Frosinone a 6,0 p.l. per mille abitanti a Isernia.



Fonte: Elaborazione CRESME su dati Ministero della Salute

Figura 420. La concentrazione sul territorio di strutture ospedaliere e posti letto

I primi risultati dell'analisi effettuata su un campione parziale restituisce già informazioni coerenti sia con i dati relativi all'universo di riferimento, sia in termini di consumi specifici in kWh/m^2 annui. La distribuzione campionaria della tipologia di strutture sanitarie ricalca in misura fedele la distribuzione rilevata nell'universo di riferimento.

I valori medi campionari restituiscono, per i 103 ospedali attualmente analizzati, un consumo elettrico di oltre 490 GWh elettrici e di circa 760 GWh termici su una superficie complessivamente servita da tali fonti energetiche superiore ai 3 milioni di m^2. I consumi specifici medi campionari risultano, dunque, pari a 163 kWh/(m^2 anno) per il

[26] Azienda Ospedaliera, Azienda Ospedaliera integrata con l'Università, Azienda Ospedaliera universitaria integrata con il SSN, Casa di cura privata accreditata, Ente di ricerca, IRCCS fondazione, IRCCS privato, IRCCS pubblico, Istituto qualificato presidio della USL, Ospedale a gestione diretta, Policlinico universitario privato, ospedale classificato o assimilato ai sensi dell'art. 1, ultimo comma, della legge 132/1968 (art. 41 legge 833/1978).

comparto elettrico e pari a 251 kWh/(m^2 anno) per il comparto termico. Le differenze territoriali evidenziano consumi complessivamente più contenuti nel Meridione e consumi più elevati nel Centro-Nord.

Il numero medio di edifici per struttura sanitaria, al netto del nutrito numero di strutture presenti nel Lazio non ancora pervenuto, si colloca a circa 3,9 edifici per struttura.

I dati risultanti dall'indagine sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/115.

Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana

Nel corso dell'annualità precedente il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici (DEIM) dell'Università di Palermo, ha eseguito un'analisi della consistenza, dello stato, e delle tipologie di involucro più significative del patrimonio edilizio scolastico siciliano, utilizzando dati statistici disponibili in letteratura e indagini di campo. Nel corso di quest'annualità si è identificato un ristretto campione di edifici scolastici rappresentativo del patrimonio edilizio siciliano. Si tratta di tre edifici adibiti a strutture scolastiche relative a differenti gradi di istruzione: una scuola elementare, una media ed una superiore. In particolare, l'edificio che ospita la scuola elementare ha subito negli ultimi anni estesi interventi di ristrutturazione e riqualificazione che hanno permesso un'analisi comparata degli effetti delle nuove normative (ad esempio, in materia di rendimento energetico in edilizia, il DPR n.59/2009) sulle prestazioni energetiche del caso studio.

Gli edifici analizzati sono rappresentativi dell'eterogeneità del patrimonio edilizio siciliano poiché si tratta di:

- edifici differenti posti nelle zone climatiche B e C, che caratterizzano più del 65% dei Comuni siciliani;
- edifici dalle caratteristiche termofisiche differenti: tipiche costruzioni degli anni '70 ($U_{superfici_verticali}$>1 W/m^2K) ed edifici ristrutturati di recente (U conforme al DPR n. 59/2009);
- edifici che ospitano scuole di differente ordine e grado.

Lo studio è stato sviluppato a partire da un approccio preliminare di raccolta ed analisi dei dati per ciascun edificio. L'analisi sistematica dei casi-studio ha consentito di dedurre le caratteristiche fondamentali per la modellizzazione: stratigrafia, spessori e qualità termofisica dell'involucro edilizio, apporti termici interni causati da apparecchiature elettroniche ed illuminanti, livelli di occupazione in ogni zona dell'edificio e relativi apporti termici interni, caratteristiche degli impianti termici e modalità di funzionamento. L'analisi non ha tralasciato di esaminare "abitudini" e "pratiche comuni" utilizzate nella gestione degli immobili.

Il passaggio seguente ha riguardato la suddivisione di ognuno dei tre edifici in opportune zone termiche, secondo logiche di uguale destinazione d'uso, di assimilabilità geometrica e di gestione comune di diversi locali da parte dello stesso impianto termico con le stesse regolazioni. Il software di calcolo prescelto per l'implementazione dei modelli è stato TRNSYS 17.01.

La struttura geometrica di ogni edificio è stata dettagliatamente descritta in 3D tramite il software Google Sketchup; tali modelli sono successivamente stati importati in ambiente TRNSYS. Ogni modello è stato costruito implementando accuratamente le informazioni raccolte nella fase preliminare, integrandolo con le informazioni riguardanti gli occupanti e alla descrizione dei carichi interni dell'edificio. Le logiche di funzionamento, di regolazione e d'uso degli impianti termici sono state implementate in ognuno dei modelli.

L'analisi delle prestazioni energetiche dei tre edifici è stata effettuata tramite un set di indicatori sintetici, al fine di ottenere dei valori di riferimento e di benchmark per il patrimonio edilizio scolastico della Regione Sicilia; tra di essi il fabbisogno energetico per riscaldamento annuo, il fabbisogno energetico per riscaldamento annuo riferito alla superficie in pianta o al numero di studenti. Si riportano alcuni risultati in Tabella 113.

Tabella 113.Indicatori specifici di valutazione dei consumi energetici di riscaldamento

Casi studio	Zona climatica	kWh/a	kWh/(m^2*a)	kWh/(studente*a)	Ordine di istruzione
Edificio 1	C	13.358,46	20,60	64,53	Scuola media superiore
Edificio 2	C	38.048	21,87	93,25	Scuola media inferiore
Edificio 3	B	2.533,33	2,94	6,21	Scuola elementare

Dai risultati emersi dalle analisi, si evince che i primi due edifici (edificio 1 e 2) sono caratterizzati da un fabbisogno energetico per il riscaldamento nettamente superiore al terzo. In particolare, il consumo specifico (kWh/m^2*anno) del terzo edificio risulta essere pari a circa il 14% del consumo specifico dell'edificio 1 e il 13% dell'Edificio 2.

Questi dati sono giustificati dal fatto che l'edificio 3, oltre che risiedere in una zona climatica più calda, ha subito estesi interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica negli ultimi anni. Infatti, esaminando le caratteristiche termofisiche degli edifici, si è rilevato altresì che i primi due edifici presentano elementi finestrati conformi al D.lgs 192/2005, mentre gli elementi opachi esterni hanno caratteristiche tipiche di edifici risalenti al periodo precedente al 1930; il terzo edificio, invece, è caratterizzato da elementi opachi e finestrati conformi alle più recenti normative (DPR n.59/2009), nonché da un impianto termico più moderno ed efficiente e da un sistema di regolazione più efficace.

La seconda fase del lavoro illustra lo stato dell'arte del "Ventilative Cooling" (raffrescamento per ventilazione) e tratta le tecniche di controllo passive e attive della movimentazione dei flussi d'aria all'interno degli ambienti confinati. L'importanza dello studio di tali tecniche è generata da un crescente interesse nell'uso della ventilazione quale strategia per garantire anche il comfort ambientale nel periodo estivo e nelle stagioni intermedie, limitando il ricorso ai sistemi di refrigerazione in un'ottica di risparmio energetico.

Il lavoro è stato sviluppato all'interno del programma dell'IEA "Energy in Buildings and Communities" (IEA-ECB), Annex 62 "Ventilative Cooling" . Il DEIM partecipa ai lavori della Subtask A dell'annesso, che focalizza il suo interesse sulla simulazione termofisica e sull'analisi del contesto legislativo a scala internazionale.

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/116.

a.3 Sviluppo sistemi

Potenzialità offerte dall'accumulo termico a lungo periodo dell'energia solare, sia per soddisfare la produzione di riscaldamento e raffrescamento ambienti, sia per quello che riguarda l'integrazione nella struttura dell'edificio delle tecnologie captanti la radiazione e di accumulo dell'energia prodotta per gli edifici NEZB.

Lo studio, svolto all'interno della collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali (D3A), esamina il tema dell'utilizzo di accumuli termici accoppiati a fonti di calore solare per il soddisfacimento dei servizi di ACS, riscaldamento e raffrescamento nel contesto di edifici particolarmente prestanti, ed in particolare nell'ottica del raggiungimento di prestazioni nZEB. Il lavoro prevedeva le seguenti fasi:

- verificare i fabbisogni di caldo e freddo di due edifici-tipo in almeno due condizioni climatiche rappresentative della situazione nazionale;
- individuare le migliori modalità di integrazione di accumuli termici a calore sensibile e latente negli stessi edifici ed i relativi impianti, andando a definire le migliori strategie di gestione.

Per quello che riguarda il primo punto, è stato tenuto presente che gli ultimi orientamenti della legislazione in fase di sviluppo (attuativo della Legge 90/13) intendono classificare come nZEB gli edifici caratterizzati da consumi di energia primaria totale (rinnovabile e non rinnovabile) corrispondenti a quelli dell'edificio di riferimento caratterizzato dai valori limite di legge previsti al 2020 e da una copertura di energie rinnovabili di almeno il 50%.

Sono stati quindi definiti i due edifici (palazzina e abitazione monofamiliare) e studiati i fabbisogni di energia per le località di Milano, Roma e Palermo, scelte al fine di offrire una rappresentazione del territorio nazionale italiano.

Per la configurazione impiantistica si è optato per un sistema formato da:

- collettori solari con prestazioni compatibili con modelli del tipo a tubi sottovuoto;
- due accumuli. Uno di capacità ridotta da portare a temperature relativamente elevate (80-90° C) nel corso del periodo estivo e idoneo per la produzione di ACS e l'alimentazione di un'eventuale macchina frigorifera ad assorbimento di piccole dimensioni. Il secondo di capacità elevata e idoneo per l'accumulo a lungo periodo (in dipendenza del dimensionamento, a sua volta dipendente da considerazioni economiche e legate all'integrabilità dell'intero sistema con l'involucro edilizio);
- sistema di riscaldamento a bassa temperatura;
- sistema di raffrescamento ad aria.

Sono state svolte le simulazioni nelle diverse località, in modo da definire:

- superfici dei collettori solari ottimali;
- dimensionamento dei serbatoi di accumulo. L'uso di materiali PCM, peraltro, non è risultato interessante;
- modalità di regolazione.

Indicativamente con dimensionamenti totali degli accumuli di 20-40 m^3 e superfici dei collettori solari di 10-20 m^2 è possibile conseguire le coperture energetiche del 50% richieste.

Dai risultati delle analisi emergono alcune importanti indicazioni: la prima riguarda il fatto che l'accumulo di calore è effettivamente tecnicamente fattibile e può contribuire in maniera sostanziale al raggiungimento delle prestazioni nZEB. All'interno di questo quadro positivo, tuttavia, si evidenziano alcuni chiari limiti che sono legati principalmente alle difficoltà di efficacia nello sfruttamento della fonte solare nel periodo estivo per il servizio di raffrescamento per via delle alte temperature richieste dagli assorbitori presenti sul mercato e del limitato numero di proposte commerciali, soprattutto per quanto riguarda le taglie offerte.

Per una descrizione dettagliata del lavoro svolto si rimanda al rapporto RdS/PAR2013/117.

Efficientamento energetico degli edifici caratterizzati da grandi volumi mediante l'utilizzo del gas come un unico vettore energetico e sistemi tecnologici di micro generazione distribuita

L'obiettivo generale del lavoro, svolto nel quadro della collaborazione con l'Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, è quello di rendere reale l'ipotesi di poter utilizzare il gas naturale come unica fonte energetica sia per la climatizzazione, sia per l'alimentazione di gran parte delle apparecchiature elettromotrici utilizzate all'interno degli edifici, al fine di migliorare l'efficienza energetica degli immobili. In tale ambito il lavoro eseguito riguarda un'analisi energetica relativa all'efficientamento di edifici con grandi volumi, inclusi gli edifici di particolare pregio, in uso alla Pubblica Amministrazione. Nel dettaglio, lo studio focalizza l'attenzione sull'ideazione di un sistema innovativo di distribuzione del vettore gas, finalizzato all'alimentazione dei principali elettrodomestici con un elevato assorbimento elettrico. Tale sistema andrebbe a sostituire l'alimentazione elettrica per la forza elettromotrice, rendendo possibile l'utilizzo dell'energia elettrica limitatamente all'alimentazione degli apparecchi illuminanti e delle utenze con basso assorbimento. Il sistema di distribuzione proposto è caratterizzato da un elevato grado di sicurezza e versatilità, in particolare l'alimentazione delle varie apparecchiature avviene mediante tecnologia *plug and play*. L'installazione della rete di distribuzione del gas naturale viene adeguata alle caratteristiche dei singoli edifici, in particolare nel caso di edifici di nuova costruzione è prevista l'installazione della rete gas all'interno di pareti ventilate opportunamente progettate, mentre nel caso di edifici di pregio si fa ricorso a pareti tecniche interne. L'intero sistema di distribuzione è monitorato mediante opportuni sistemi smart metering sia per la contabilizzazione dei consumi sia per il mantenimento di elevati livelli di sicurezza degli edifici stessi.

Nello studio sono state analizzate le possibili soluzioni innovative dei sistemi di smart metering e delle pareti ventilate, esaminando nel dettaglio il comportamento di queste ultime sotto diversi aspetti. Nel rapporto RdS/PAR2013/118 è presentata un'analisi dettagliata sulle possibili configurazioni delle pareti ventilate al fine di ridurre il rischio di formazione di atmosfere esplosive. Una simile analisi è stata condotta mediante analisi parametriche e simulazioni termo fluidodinamiche realizzate mediante il codice di calcolo Ansys Fluent 6.3. Dallo studio emerge come riguardo alle pareti ventilate è indispensabile mantenere un adeguato grado di ventilazione dell'intercapedine al fine di ridurre la probabilità di formazione di atmosfere esplosive. Tale obiettivo può essere perseguito sfruttando la convezione naturale e realizzando pareti con un'intercapedine proporzionale al livello di sicurezza richiesto. Nel caso di edifici in cui è possibile modificare le facciate esterne, la rete di distribuzione può essere integrata all'interno di pareti ventilate, in particolare nel lavoro esposto si è analizzata la fattibilità tecnica dell'installazione della rete gas nell'intercapedine ventilata.

In base alle tendenze costruttive presenti in commercio e ai risultati dell'analisi parametrica, si è deciso di analizzare due tipologie di pareti, con spessore dell'intercapedine rispettivamente di 8 e 10 cm. I due modelli di parete permettono entrambi un elevato abbattimento della concentrazione di gas. Ad ogni modo, a parità di portata dispersa di gas naturale una parete ventilata con spessore dell'intercapedine di 10 cm permette una riduzione di concentrazione di gas prossima al 70% rispetto ad un'equivalente parete con intercapedine di 8 cm. Entrambe le soluzioni possono trovare impiego concreto in diverse applicazioni, in particolare la parete con intercapedine di 10 cm è indicata per applicazioni in cui il rischio di dispersioni del gas. risulta maggiore, o comunque nei casi in cui le portate di gas distribuite dalla rete sono maggiori, come ad esempio in edifici pubblici di elevate volumetrie. Una validazione di tali risultati mediante misure di carattere sperimentale risulta indispensabile al fine di arrivare ad un maggiore grado di comprensione del fenomeno e quindi ad una più corretta progettazione di dettaglio della parete ventilata e del sistema di distribuzione del gas.

Nel caso in cui le condizioni termo igrometriche non risultino favorevoli, si prevede comunque la realizzazione di un sistema di ventilazione forzata automatizzato.

Dal punto di vista della sicurezza i recenti sviluppi della tecnologia domotica rende fattibile un'interconnessione tra i sistemi di smart metering e dispositivi automatici per l'interruzione dell'alimentazione gas o dell'energia elettrica nel caso di rilevazione di dispersioni di gas. Confidando sull'attuale potenzialità dei dispositivi domotici, è

inoltre possibile realizzare sistemi in grado di instaurare una ventilazione forzata all'interno di volumetrie sensibili, al fine di ridurre la probabilità di formazione di atmosfere esplosive.

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto è contenuta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/118.

Valutazione di applicabilità del metodo RTS come codice di calcolo per la certificazione energetica degli edifici

La qualità e l'efficienza energetica degli edifici rivestono, ormai da tempo, ruoli importanti e strategici ai fini del raggiungimento degli obiettivi di contenimento dei consumi energetici fissati dalle normative europee. Il processo di certificazione energetica degli edifici vede come prime disposizioni nazionali in materia la legge 10/91, volta a favorire e ad incentivare, tra l'altro, l'uso razionale dell'energia, lo sviluppo delle fonti rinnovabili e la riduzione dei consumi specifici di energia nei processi produttivi. Successivamente, la normativa è stata rivisitata e integrata dai D.Lgs. n. 192/2005 e n. 311/2006, che hanno recepito la Direttiva 2002/91/C, che insieme alle direttive 2006/32/CE e 2010/31/UE costituisce le linee per la determinazione della prestazione energetica degli edifici e obbliga gli Stati membri al recepimento delle misure previste nelle stesse.

Il D.Lgs. 192/2005 stabilisce i requisiti minimi prestazionali degli edifici e l'obbligatorietà della certificazione energetica e, in particolare, pone l'attenzione sulle problematiche relative all'influenza degli aspetti dinamici nel calcolo del bilancio energetico dell'edificio. Lo stesso decreto (allegato I, comma 16) recita che nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione diversi fattori, tra i quali: "*per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria maggiore di 10.000 m^2, l'influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione*".

Da ciò nasce l'esigenza di disporre di una metodologia che tenga conto delle caratteristiche dinamiche degli elementi costruttivi e costitutivi l'involucro nel calcolo del comportamento termofisico dell'edificio, ad oggi non ancora contemplata in alcuna normativa.

Obiettivo dell'attività svolta è stato quello di proporre una metodologia di calcolo per poter redigere certificazioni energetiche tenendo conto dell'influenza dei fenomeni dinamici sulla determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Nello specifico è stato analizzato il simulatore O.DES.S.E. di ENEA, sviluppato nelle precedenti annualità (PAR 2009-2012) e utilizzato come codice di calcolo dinamico, basato sul metodo RTS (*Radiative Time Series*), proposto nell'Handbook 2009, ASHRAE. In parallelo nell'ambito della collaborazione con la Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Catania è stata sviluppata una metodologia dinamica che implementa il calcolo orario previsto dalla UNI EN 13790.

Il lavoro svolto ha evidenziato come il metodo RTS sia idoneo ad essere implementato in un codice di calcolo dinamico, ma complesso nella definizione dei coefficienti RTSf necessari al calcolo della prestazione energetica degli edifici. Inoltre si osserva che il metodo RTS richiede una conoscenza dei fenomeni dinamici che governano lo scambio termico di un edificio non comune nell'utente-tecnico medio.

Alla luce dei risultati emersi dall'attività svolta dall'Università di Catania [rapporto Rds/PAR2013/119] sull'implementazione della metodologia del calcolo orario prevista dalla UNI EN 13790 (metodo R5C1) si è concluso che quest'ultima è reputata più idonea alle esigenze di semplicità e precisione richieste alla metodologia di calcolo per la certificazione dinamica degli edifici.

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto è contenuta nel rapporto RdS/PAR2013/146.

Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici

La valutazione dei consumi energetici degli edifici pubblici affidabile richiede uno strumento di calcolo rapido e funzionale che possa superare i limiti dei metodi di calcolo statici effettuati tipicamente secondo le norme UNI TS 11300.

Nel quadro della collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Catania, è stata pertanto analizzata la Norma Internazionale UNI EN 13790:2008 al fine di valutare l'utilizzo del modello *R5C1* (cinque resistenze ed una capacità) per un calcolo degli scambi energetici più affidabile, in special modo per gli edifici pubblici.

Oltre al riscaldamento, considerate le peculiarità del raffrescamento per la variabilità in transitorio delle condizioni esterne e gli effetti non trascurabili degli accumuli termici negli elementi costitutivi dell'edificio, si è ritenuto necessario valutare la fattibilità di un calcolo dinamico orario per il periodo estivo. Questo al fine di avere uno strumento di calcolo agevole e rapido per calcolare sia l'energia primaria stagionale che i carichi termici orari degli edifici ai fini progettuali.

E' stato analizzato solamente il metodo orario semplificato che risolve il circuito equivalente proposto dalla norma.

Il lavoro è stato inizialmente rivolto alla risoluzione oraria del circuito equivalente proposto dalla Norma Internazionale UNI EN 13790, detto anche *R5C1*, e si è predisposto una serie di programmi di calcolo in MATLAB® per risolvere iterativamente, con il metodo di *Heun,* l'integrale generale dell'equazione differenziale del primo ordine non omogenea che è determinata dalla presenza della capacità termica C_m. Successivamente si è analizzato e risolto il modello in tre possibili condizioni:

- evoluzione libera del sistema;
- evoluzione con temperatura dell'aria interna imposta;
- evoluzione mista, in parte libera e in parte con temperatura interna imposta.

La prima condizione studia l'evoluzione dell'edificio in condizioni di transitorio termico puro, cioè senza l'intervento di impianti di climatizzazione esterni. Viene così determinata la cosiddetta *risposta propria* del sistema.

La seconda condizione prevede che sia presente un impianto di climatizzazione che provveda a mantenere *costante* (valore di settaggio o di *termostato*) la temperatura interna, T_{air} = cost (anche se non necessariamente costante per tutte le 24 ore potendosi avere anche il caso di temperatura attenuata, come avviene tipicamente nelle zone climatiche dalla C in su in inverno). In questo modo si ha una risposta che definiamo *forzata* del sistema e si determina il cosiddetto *bilancio termico* (per il raffrescamento ci si riferisce all'*extraction rate*) cioè al calore da fornire, col proprio segno (solitamente positivo in inverno e negativo in estate) all'edificio per mantenere la condizione imposta. Il bilancio termico così calcolato è, di fatto, un calcolo energetico piuttosto raffinato che tiene conto anche degli stile di vita all'interno degli edifici e quindi dei cosiddetti *profili d'suo* sia per le sorgenti interne che per gli impianti. L'interazione edificio-impianto è tenuta in maggior considerazione rispetto alle valutazioni statiche.

La terza condizione è una combinazione delle due e si riferisce al caso più generale in cui gli impianti sono accesi ad intervalli di tempo prefissati (quindi si ha T_{air} =$T_{imposta}$) e in parte sono spenti (quindi si ha il transitorio libero). E' questa la condizione che si ha, ad esempio, nelle zone climatiche A e B (accensione parziale degli impianti con il limite di 8 ore al giorno in inverno). Al fine del corretto calcolo dell'energia primaria stagionale e/o dei consumi energetici è a questo secondo caso che ci si deve riferire.

Si è poi cercato di semplificare l'iter della preparazione dei dati di input per il modello ridotto *R5C1* apportando alcune semplificazioni utili per un utilizzo sul campo.

Il modello è stato poi studiato anche con la possibilità di avere la *Ventilazione Meccanica Controllata* (CMC) e quindi di poter variare sia la temperatura dell'aria di immissione per la ventilazione, T_{sup}, che la portata stessa di ventilazione.

Infine, con l'ipotesi di transitori trascurabili per le pareti di separazione interne per la durata del passo di calcolo di un'ora, si è sperimentato un utilizzo *multi room* dello stesso modello in modo da ottenere dati di calcolo disaggregati per ciascun ambiente, anziché riferiti unicamente all'edificio, che tengono conto delle variabilità proprie delle forzanti esterne (temperature e irradiazione solare) oltre che delle peculiarità costruttive presenti nei singoli ambienti.

In questo modo lo strumento di calcolo qui proposto diviene ancora più potente e può essere utilizzato anche per verifiche energetiche su singole parti dell'edificio oltre che per la progettazione impiantistica potendosi avere una sorta di carico di picco estivo.

I risultati ottenuti in questo studio per l'utilizzo del modello ridotto proposto dalla UNI EN 13790:2008 sono stati positivi. E Infatti, pur utilizzando un modello ridotto del tipo *R5C1*, che sintetizza l'edificio in solo sei parametri interni (5 resistenze termiche ed 1 capacità termica), si sono ottenuti risultati che reggono bene il confronto con quelli ottenuti da codici di calcolo più complessi, quali, ad esempio, quelli che utilizzano il metodo delle *Funzioni di Trasferimento* (*TFM*) proposto dall'ASHRAE già dal 1997.

Il modello analizzato e proposto, è stato risolto con il metodo orario che offre il vantaggio di un'analisi *dinamica* dei transitori termici e quindi produce risultati di maggior pregio e con più informazioni rispetto ai metodi statici.

Infatti il metodo di calcolo orario, unico implementato in questo studio per tenere conto anche dei profili d'uso degli impianti e delle sorgenti interne, può ben essere utilizzato per stimare i valori medi mensili delle grandezze calcolate esplicitando, inoltre, la loro variabilità, altrimenti impossibile da determinare con i metodi statici accreditati.

Quest'ultima considerazione consente di valutare i consumi energetici mensili e stagionali con maggior dettaglio, tenendo conto anche la reale *interazione edificio-impianti* (ore di funzionamento, temperatura di *setting*, variabilità dei carichi interni e del flusso solare, variabilità della portata di ventilazione con la VMC) e cioè del profilo d'uso dell'edificio e degli impianti.

Nasce quindi il problema di normare la metodologia di calcolo dinamica qui presentata con profili d'uso standard sia per le varie zone climatiche che per le condizioni di utilizzo degli impianti, sia di riscaldamento che di raffrescamento, nelle varie tipologie di edifici (uffici, scuole, ospedali, ecc.).

La possibilità di analizzare più sequenze giornaliere consente di utilizzare serie storiche di dati o sequenze generate con il *Test Reference Year* (*TRY*) ottenendo risultati ancora più precisi di quelli riferiti al giorno medio mensile. Inoltre l'interazione edificio-impianti consente di calcolare con molto realismo l'energia scambiata dall'edificio, ad esempio, escludendo gli impianti durante il surriscaldamento invernale dovuto alla radiazione solare.

Si possono ipotizzare profili standard di utilizzo degli impianti e dei profili d'uso delle sorgenti interne (affollamento, ACS, illuminazione, recuperi impiantistici, ecc) per le varie tipologie di edifici pubblici (scuole, uffici, ospedali, tribunali, ecc.) così che si possano calcolare i consumi energetici in modo univoco, ripetibile e confrontabile.

Il modello di calcolo è stato implementato su due fasi:

- la prima di preparazione dei dati di input (conduttanze, capacità termica dinamica, superfici equivalenti di massa e totale) e dei vettori di input (dati climatici per T_e, T_{sup}, I_{sol}, …) sia per il giorno tipo o per sequenze di più giorni;
- la seconda di calcolo delle grandezza incognite (T_m, T_s, T_{air}, $F_{HC,nd}$) ai vari regimi (libero, forzato e/o misto) mediante programmi di calcolo in MATLAB®.

I dati calcolati sono anche registrati dalla routine di calcolo in file di output che possono poi essere analizzati separatamente per successive elaborazioni.

Oltre alla possibilità di un utilizzo di tipo *multi room* il metodo orario implementato consente di elaborare vettori di input su più giorni. Questo consente di analizzare anche un diverso regime degli impianti durante il fine settimana.

Le sequenze giornaliere possono essere riferite a dati sperimentali di temperature ed irraggiamento o a sequenze derivate da *reference year* per ciascuna località. Per quest'ultimo caso può essere utile consultare il sito http://www.itmeteodata.com/, gestito dall'Università di Bologna, che fornisce i dati metereologici per il *TRY* (*Test Reference Year*) per molte località italiane.

La EN 15603:2013 ha recentemente proposto un nuovo modello di tipo RC ma con più resistenze e con più capacità termiche. Sono state infatti osservate, dallo stesso propositore del modello R5C1 D. van Dijk, tutte le criticità evidenziate per il modello semplificato qui analizzato. Tuttavia questo nuovo modello risulta ancora in fase di definizione e pertanto non è stato incluso in questo studio.

E' stata effettuata una doppia validazione del modello proposto. In particolare:

- la prima basata sul confronto dei risultati di calcolo dinamici con quelli ottenuti da modelli di calcolo più complessi ed affidabili, quali il TFM;
- la seconda basata sul confronto dei consumi energetici reali di due edifici, già precedentemente analizzati al fine di una riqualificazione energetica.

Le due fasi di validazione hanno dato risultati positivi sull'utilizzo del modello *R5C1* e ne hanno esaltato le qualità derivanti dalla soluzione dinamica. Lo studio attuale è stato sostanzialmente indirizzato ad una prototipizzazione della procedura di calcolo oraria e pertanto non si è focalizzato nello sviluppo di un'interfaccia software *user friendly*.

Il lavoro è descritto nei dettagli nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/119.

Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici

Il contributo dell'illuminazione artificiale, essenzialmente nell'edilizia non residenziale, ricopre una percentuale significativa del consumo elettrico degli edifici, che può arrivare ad oltre il 40% per i grandi edifici commerciali. Il dato trova spiegazione nel fatto che, nonostante la tecnologia dell'illuminazione artificiale abbia avuto negli ultimi anni un notevole salto, lo sfruttamento dell'illuminazione naturale è una strategia sempre meno utilizzata.

La norma *UNI EN 159193:2008 Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione* consente di stimare il consumo di energia elettrica per illuminazione via calcolo, tenendo conto del contributo del daylighting. La norma si basa su una serie di dati pre-calcolati che non tengono, però, conto delle condizioni climatiche della singola località introducendo un livello di approssimazione che merita analisi approfondite. Il lavoro svolto da ENEA pone le basi per un metodo alternativo, basato non su dati pre-calcolati ma su misure dei livelli di illuminamento a terra, che consentono di stimare in modo più accurato l'effettivo fabbisogno di illuminazione artificiale, quando l'illuminazione naturale non è in grado di assicurare gli adeguati livelli di comfort e task visivi.

Il metodo proposto dalla norma e il metodo alternativo sono stati testati su un edificio con destinazione uffici e i risultati comparati per valutare le eventuali discrepanze. Le variabili considerate sono: zona climatica (Palermo, Roma, Milano in rappresentanza delle principali aree geografiche del Paese); il livello di illuminamento richiesto sul piano orizzontale (300, 500 e 750 lux, valori di riferimento per uffici in funzione di diversi compiti visivi); diverse posizioni di calcolo del fattore di luce diurna in ambiente (1, 2, 3, 4 m dalla facciata e valore medio).

I risultati ottenuti evidenziano i limiti dell'attuale norma che conduce ad una considerevole sovrastima del fabbisogno energetico per illuminazione artificiale. La conseguenza implicita è l'adozione erronea dei limiti di consumo degli edifici, sovrastimanti e scollegati da quanto riscontrabile nella realtà, particolarmente critica nel momento in cui saranno introdotte le definizione di edifici a consumo quasi zero. Altra criticità è legata alla riqualificazione energetica, stime elevate dei consumi di illuminazione potrebbero favorire azioni di retrofit suggerendo risparmi non congruenti con quanto riscontrabile successivamente nella pratica.

Dettagli sull'attività sono riportati nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/120.

b. Modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica per le Pubbliche Amministrazioni

b.1 Sviluppo modelli

Progettazione di strumento di calcolo per la redazione del bilancio energetico territoriali

La attività, svolta nell'ambito della collaborazione con il Politecnico di Torino, costituisce il proseguimento di quella svolta nel PAR 2012 che avevano riguardato la definizione di dettaglio di una metodologia innovativa per la costruzione e l'analisi di bilanci energetici territoriali denominata Local Energy Balance (LEB).

L'articolata struttura del modello di calcolo è stata sviluppata in modo da poter rispondere completamente alle crescenti esigenze di statistica e pianificazione energetica locale determinate dagli obiettivi delle politiche comunitarie. Analogamente, il modello è risultato adeguato a supportare statistiche ed analisi settoriali quali, in particolare, quelle relative ai consumi finali del settore terziario pubblico.

L'analisi svolta ha evidenziato come il grado di dettaglio richiesto sia significativamente più elevato rispetto a quello attualmente offerto dalla statistiche energetica convenzionale. Le verifiche condotte hanno indicato come una parte significativa dei dati necessari è già disponibile ed è attualmente utilizzata per la redazione dei Bilanci Energetici Regionali ENEA. Sono però necessarie integrazioni con ulteriori informazioni, al fine di raggiungere il grado di dettaglio richiesto per la quantificazione delle grandezze necessarie a definire gli obiettivi europei 2020 del Pacchetto Clima ed Energia.

LEB rappresenta il sistema energetico del territorio in esame 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 CO_2 originata dal suo processo di generazione. I consumi relativi ai principali aggregati sono evidenziati da specifici contatori.

Rispetto alle metodologie convenzionali attualmente in uso, LEB offre una serie di elementi innovativi, quali:

- una rappresentazione dettagliata ed esaustiva degli elementi maggiormente impattati dalle esigenze di analisi e pianificazione, quali quelli inerenti le energie rinnovabili, la cogenerazione e la trigenerazione, la generazione distribuita presso gli utenti con i relativi scambi bidirezionali con le reti, il teleriscaldamento e il teleraffrescamento;
- un'impostazione di calcolo che 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 garanzia di coerenza intrinseca al modello di calcolo tra tutti i dati e risultati, anche in presenza di molteplici variazioni associate alle diverse ipotesi di scenario previsionale.

Nella presente annualità LEB è stato implementato attraverso un sistema di fogli di calcolo MS Excel. In questa versione preliminare, LEB ha già trovato significative applicazioni nella pianificazione energetica locale. La Provincia di Torino (ora Città Metropolitana) ha adottato stabilmente il LEB per la redazione e l'analisi dei propri bilanci energetici provinciali che, grazie allo strumento, sono disponibili nella serie storica completa 2000 - 2011. Analogamente, il LEB è stato applicato alla predisposizione degli scenari previsionali 2020 contenuti nel nuovo "Piano di azione per l'anergia sostenibile della Provincia di Torino" (gennaio 2014). La Regione Valle d'Aosta ha utilizzato il LEB in occasione dell'ultimo aggiornamento del proprio bilancio energetico regionale.

Il lavoro svolto e la relativa esperienza conseguita hanno messo in evidenza, da parte degli operatori della pianificazione energetica locale, alcuni elementi:

- una richiesta crescente di utilizzo del LEB per riuscire a tracciare il dettaglio richiesto dall'applicazione degli obiettivi energetici comunitari;
- una difficoltà a gestire la conseguente complessità intrinseca al modello di bilancio energetico territoriale adottato;
- l'esigenza di poter utilizzare la metodologia LEB attraverso uno strumento di gestione dei dati con maggiori caratteristiche di interazione con l'utente.

Queste sollecitazioni hanno orientato gli obiettivi delle attività PAR 2013 sulla progettazione e la realizzazione prototipale di uno strumento software open source per l'implementazione della metodologia LEB. Tale strumento è costituito da due componenti:

- un database di riferimento, strutturato per rappresentare in modo completo i dati di un generico sistema energetico territoriale;
- un'interfaccia grafica per la gestione del database e la rappresentazione delle relative informazioni.

Gli elementi emersi nei test condotti nella precedente di fase di lavoro hanno permesso di individuare i principali criteri per la definizione dell'architettura del database e della sua interfaccia, come di seguito elencato:

- una struttura di calcolo costruita in funzione della disponibilità attuale di informazioni energetiche dirette da parte dei soggetti preposti alla redazione di bilanci energetici;
- la predisposizione per l'effettuazione di integrazioni con ulteriori informazioni energetiche dirette potenzialmente disponibili alla PA o stime indirette definibili da altre informazioni territoriali;
- l'applicabilità dello strumento a differenti livelli di scala territoriale (nazionale, regionale, comunale, fino al bilancio energetico di un singolo ente pubblico), con un'organizzazione dei dati che ne consente l'integrazione in un unico sistema informativo.

Pertanto le attività sono state finalizzate allo sviluppo dello strumento software, secondo le seguenti fasi di lavoro:

- la reingegnerizzazione del precedente modello LEB e conseguente formulazione dell'organizzazione del database;
- la progettazione del modello dati e dell'interfaccia grafica, attraverso la realizzazione (a livello di prototipo) dei relativi codici di calcolo e gestione;
- la conduzione di alcuni test applicativi per la verifica della corretta funzionalità del prototipo.

Il nuovo database consente una notevole estensione della capacità operativa dello strumento, grazie al superamento dei limiti di elaborazione dell'ambiente di sviluppo utilizzato per la versione preesistente (MS Excel). La scelta di un modello dati di tipo relazione consente, inoltre, una massimizzazione della flessibilità della sua struttura e una contestuale minimizzazione della presenza di dati ridondati. Questi benefici si traducono in un incremento della velocità di accesso al dato, sia in lettura che in scrittura.

La nuova interfaccia di visualizzazione utilizza una grafica vettoriale scalabile, sia in relazione alle dimensioni effettive del diagramma da rappresentare, sia in funzione della quantità di dati presenti nel database. Pur mantenendo integralmente il dettaglio dei dati di origine, il risultato informativo offerto dalla navigazione nel diagramma LEB consente una lettura con differenti livelli di approfondimento e selezione.

I principali punti di forza dello strumento sviluppato possono essere riepilogati come segue:

- l'architettura predisposta per l'elaborazione di grandi moli di dati, per rendere possibili molteplici analisi pluriennali di set di dati storici e previsionali, senza vincoli di numerosità e dettaglio;
- la virtualizzazione del sistema con la gestione centralizzata delle basi informative, che consente l'accesso multiplo e condiviso ai dati garantendone contestualmente la loro consistenza e la tracciabilità dei loro aggiornamenti;
- il disegno modulare aperto ad ulteriori adattamenti metodologici ed estensioni degli elementi rappresentanti nel modello di bilancio energetico, ad esempio per quanto riguarda la tipologia delle

trasformazioni e il dettaglio negli usi finali;
- la semplicità e libertà di impiego del sistema, offerta dallo sviluppo interamente open source dei codici di calcolo, gestione e visualizzazione

L'operatività dello strumento è stata confermata dagli esiti positivi dei test condotti su due casi-studio reali (Regione Piemonte e Provincia di Torino). Il modello dati e la rappresentazione grafica si sono dimostrati adeguati all'analisi dei bilanci energetici dei territori studiati.

Le attività svolte sono dettagliate nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/121.

Studio e validazione di un modello previsionale di consumo energetico per la verifica dell'efficienza energetica dei centri sportivi

Le attività svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica dell'Università Sapienza di Roma erano focalizzate allo sviluppo di un modello di calcolo per la previsione dei consumi energetici di un generico centro sportivo.

Nella prima fase del lavoro è stata effettuata un'indagine statistica, su circa 200 impianti sparsi sull'intero territorio nazionale (quelli validi per la ricerca, dei quali è stato possibile reperire e confermare tutti i dati di interesse, sono 162), per comprendere quali fossero le più logiche suddivisioni dei diversi centri sportivi in funzione di variabili come, ad esempio, il tipo di sport, l'eterogeneità degli sport praticati all'interno nel caso di impianti polisportivi, la zona climatica, la superficie occupata, la tipologia di macchine da conversione istallate, il livello di ottimizzazione, etc.

Nell'ambito del lavoro si sono rilevati come pesi, in termini energetici, la qualità della gestione e la capacità di intervento organizzativo e tecnico dei gestori. Da tali indagini si è arrivati a definire quali fossero i principali interventi di risparmio energetico che portano margini significativi di ottimizzazione. Di fatto sono stati definiti ed indicati gli interventi edili, impiantistici e di processo con i relativi margini di risparmio prevedibili per la valutazione dei consumi.

Nel modello di previsione proposto, i diversi tipi di impianto sportivo vengono quindi caratterizzati e definiti, principalmente in funzione della superficie, del tipo di sport praticato, della zona climatica e del numero di interventi di risparmio energetico effettuati. Un aspetto innovativo del lavoro in oggetto risiede nella proposta di effettuare una valutazione dell'utilizzo di energia che non sia esclusivamente quantitativa ma anche fortemente qualitativa.

In breve, i risultati ottenuti possono essere sintetizzati come segue:

- analisi energetica di 162 centri sportivi e dello scenario generale nazionale;
- valutazione degli indicatori di consumo per tutte le tipologie di ambienti dedicati allo sport;
- indicazioni per la caratterizzazione energetica delle diverse strutture sportive, in funzione di: sport praticati, tipologia di ambienti, zone climatiche e, soprattutto, qualità della gestione;
- suddivisione e valorizzazione degli impianti sportivi in funzione della quantità di interventi di risparmio energetico effettuati, valore risultato proporzionale al livello di ottimizzazione energetica dei centri sportivi;
- studio di un sistema per la valutazione qualitativa dei consumi e proposta di utilizzo di un nuovo cruscotto che, per fornire possibilità di confronto, tenga conto delle statistiche sui consumi del settore;
- calcolo del fattore di scala che lega i consumi dei centri sportivi alla superficie occupata;
- definizione del modello di previsione energetica per i centri sportivi.

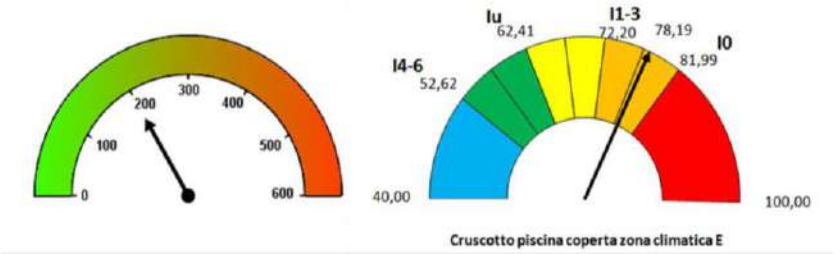
Il modello di calcolo proposto si presenta utile, con una doppia valenza, per i gestori di impianti sportivi, che possono:

- avere a preventivo una indicazione di quanta energia risulterà impegnata;
- valutare a consuntivo, per confronto, il proprio livello di ottimizzazione.

In conclusione, come risultato tecnico operativo del presente lavoro si possono brevemente indicare le seguenti principali voci:

- valutazione degli indicatori specifici di consumo, suddivisi per tipo di ambiente sportivo, per zona climatica e per livello di ottimizzazione;
- proposta di un modello matematico di valutazione dei consumi basato sugli indicatori specifici di consumo;
- proposta di nuovi cruscotti di valutazione grafica suddivisi in diverse fasce di ottimizzazione (Figura 422); questo perché il gestore possa qualitativamente riconoscersi e collocarsi in una ben definita fascia di

merito; di fatto si propone di superare i normali cruscotti nei quali non è possibile comprendere la relazione tra il dato, la scala di misura e il peso energetico-economico che ha il numero.



Modello tradizionale di cruscotto di tipo quantitativo

Nuovo cruscotto di tipo quantitativo e qualitativo

Figura 421. Confronto tra cruscotto quantitativo tradizionale e quello innovativo proposto

Una descrizione dettagliata del lavoro svolto è contenuta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/122.

Linee guida per l'applicazione di piccole e medie reti di teleriscaldamento nei comuni in fascia climatica E e F

Sulla base delle assodate possibilità di espansione delle reti nelle fasce climatiche E ed F, dei colloqui intercorsi con gli energy manager e gli stakeholder del settore (i cui risultati sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/132 ("*Indagine sulla conoscenza e diffusione del teleriscaldamento nei comuni in zone E ed F e analisi dei dati di tre reti*") e dell'analisi delle recenti Direttive sulle rinnovabili e l'efficienza energetica che riguardano il teleriscaldamento, in collaborazione con collaborazione con la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE), sono state redatte delle sintetiche linee guida che intendono fornire un orientamento per i comuni che volessero valutare la possibilità di realizzare una rete di teleriscaldamento. Esse sono rivolte ai comuni delle fasce climatiche E ed F, ma possono essere tenute in considerazione anche da comuni di fasce climatiche differenti, laddove si verifichino delle condizioni favorevoli.

Vengono descritti dapprima i principali passi da compiere, alla luce sia delle possibilità offerte che degli obblighi previsti dai D.Lgs. 28/2011 e 102/2014, quali l'assimilazione delle reti alle opere di urbanizzazione primaria, la verifica da parte dei comuni della disponibilità di soggetti terzi a integrare reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento in sede di pianificazione e progettazione di infrastrutture di primaria importanza, le novità in tema di misurazione del calore, e l'obbligo previsto per le imprese soggette a diagnosi (c.d. grandi imprese) di considerare, in fase di diagnosi, l'opportunità dell'impiego di calore cogenerato o dell'allaccio a una rete di teleriscaldamento se l'impresa è localizzata in prossimità di cogeneratori o reti esistenti.

Vengono poi descritti i rapporti con la cittadinanza e l'utenza. La cittadinanza viene interessata dalla costruzione o dall'estensione di una rete in due fasi (oltreché nel periodo iniziale in cui si discute sull'opportunità di realizzazione): una prima, passiva, nel momento della realizzazione dell'opera, in cui ne subisce i disservizi conseguenti, e un'altra, attiva, in cui il cittadino diventa utente della rete, nel caso decida di allacciarsi. Vengono inoltre segnalati i possibili vantaggi per l'utenza a seguito di un'iniziativa ben progettata e realizzata.

Successivamente vengono descritti i passi da compiere in fase di approccio alla realizzazione e il reperimento delle risorse, che può avvenire mediante il finanziamento tramite terzi o anche tramite fondi o programmi dedicati, il più recente dei quali è il fondo per l'efficienza energetica previsto dal citato D.Lgs. 102/2014.

A fini operativi è stata costruita, sulla base dell'analisi del settore e dei colloqui intercorsi con gli energy manager intervistati, una tabella (Tabella 114) con una stima del grado di convenienza di un sistema di teleriscaldamento (impianto di produzione e rete) basato sull'utilizzo di risorse locali, la quale associa la presenza o meno della rete del gas naturale con tre ulteriori condizioni verificabili nella pratica, e vuole essere di ausilio per una valutazione preliminare dell'opportunità di realizzare una rete di teleriscaldamento. I parametri considerati sono i seguenti:

- ubicazione impianto e rete in aree metanizzate;
- disponibilità o meno di risorse in loco, ossia fonti rinnovabili o energia termica recuperabile;
- previsione di una contemporanea realizzazione di altre infrastrutture quali reti fognarie, estensioni di acquedotti, linee elettriche interrate, fibra ottica;
- zone già interessate, o che lo saranno a breve termine, da alta o bassa intensità abitativa.

Tabella 114. Stima del grado di convenienza dell'intervento (••••molto interessante /•scarsamente appetibile

	Possibilità di impiego di risorse locali (FER, recuperi termici)				Non disponibilità risorse locali (FER, recuperi termici)			
	Co-realizzazione di altre infrastrutture		Realizzazione della sola rete di TLR		Co-realizzazione di altre infrastrutture		Realizzazione della sola rete di TLR	
	Alta densità abitativa	Bassa densità abitativa	Alta densità abitativa	Bassa densità abitativa	Alta densità abitativa	Bassa densità abitativa	Alta densità abitativa	Bassa densità abitativa
Aree metanizzate	•••	••	•••	•	••••	••	••	•
Aree non metanizzate	••••	••	•••	••	••	•	•	•

La guida è stata pensata per essere consultata in primo luogo da decisori ed energy manager, le figure più interessate all'interno di un ente locale nel caso s'intendesse valutare la possibilità del teleriscaldamento. A tale scopo è stato inserito un paragrafo con i possibili ruoli che l'energy manager nominato da un comune può avere nel momento in cui il comune stesso decide di procedere con un'iniziativa di teleriscaldamento o di creare le condizioni affinché dei terzi possano farlo. Un energy manager, in tale contesto, può:

- essere promotore o prendere parte alla fase iniziale di valutazione;
- collaborare con i decisori per l'individuazione della forma più appropriata di coinvolgimento dell'ente, ossia proprietario e gestore, solo proprietario, nessun coinvolgimento (eccetto chiaramente il ruolo istituzionale nella concessione delle autorizzazioni e permessi);
- collaborare alla definizione dell'impostazione giuridica da dare al teleriscaldamento (concessione o altro);
- farsi promotore e organizzatore dei piani di diffusione e degli incontri con la popolazione, nel caso di coinvolgimento diretto del comune nella realizzazione dell'opera;
- in caso di coinvolgimento diretto dell'ente nell'iniziativa, proporre le opzioni più idonee in termini di centrali da installare e risorse da sfruttare sul territorio (fonti rinnovabili o recupero termico da stabilimenti produttivi), monitorare lo stato di avanzamento dei lavori;
- essere controparte tecnica in caso di coinvolgimento di una ESCO o di affidamento a terzi della gestione della rete e figura di riferimento nella fase di richiesta di incentivi o accesso a bandi e fondi o nel monitoraggio delle relative pratiche;
- occuparsi della reportistica, sia in caso di coinvolgimento diretto dell'ente, per mostrare i risultati ottenuti, sia in caso di iniziativa in capo a terzi, per valutare gli effetti dell'iniziativa sul territorio.

Parte rilevante del documento è dedicata agli incentivi e ai benefici fiscali ottenibili, quali possono essere:

- per il sistema rete-allacci quelli offerti dai certificati bianchi con la scheda 22T per l'allaccio di utenze civili alle reti, le detrazioni fiscali per l'esecuzione degli allacci, gli sgravi fiscali per il combustibile;
- per la combinazione impianto-rete i certificati bianchi per la cogenerazione ad alto rendimento abbinata al teleriscaldamento;
- per i piccoli impianti il conto termico per le caldaie o il solare termico associato a piccole reti, oppure i certificati bianchi utilizzando la scheda 26T per il settore civile o il metodo a consuntivo per il settore industriale.

L'attività svolta è descritta nei dettagli nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/123.

Indagine sulla conoscenza e diffusione del teleriscaldamento nei comuni in zone E ed F e analisi dei dati di tre reti

Il settore del teleriscaldamento è stato negli ultimi anni oggetto di rilevante attenzione da parte degli organi legislativi, sia a livello comunitario che nazionale. In Europa il teleriscaldamento è menzionato e promosso in almeno due provvedimenti di primaria importanza, le Direttive 2012/27/UE e 2010/75/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio.

A livello nazionale il teleriscaldamento opera in un quadro evoluto dal punto di vista tecnico, con una moltitudine di impianti di taglie molto differenziate presenti in Centro-Nord Italia, a fronte di un potenziale applicativo non ancora sfruttato appieno e di un quadro giuridico al momento non chiaramente definito, con vari pronunciamenti, diversificati anche nell'orientamento, da parte della giustizia amministrativa.

Il lavoro svolto ha riguardato le reti di teleriscaldamento dei comuni in zone climatiche E ed F e ha avuto due obiettivi principali:

- analizzare il grado di attenzione al tema del teleriscaldamento nei comuni che hanno nominato un energy manager, coinvolgendo gli energy manager stessi per mezzo di un'apposita indagine; l'analisi dei risultati è stata integrata con alcune interviste alle principali associazioni di categoria del settore e a due stakeholder, una società privata e una Unione di comuni;
- effettuare un'analisi ragionata dei dati di funzionamento di tre impianti nelle fasce climatiche considerate.

Contestualmente, sulla base dell'indagine e della raccolta dati, si è ritenuto utile fornire una sintesi delle principali barriere emerse.

Una delle ragioni principali per le quali si è deciso di coinvolgere gli energy manager, è che essi risultano essere nei comuni, in particolare nel caso di piccole realtà, i primi referenti sui temi energetici in generale, sebbene non siano essi (o meglio i comuni dai quali sono stati nominati) i proprietari o i gestori degli impianti e delle reti. Tutto ciò sia al fine di rendere disponibili in maniera aggregata e critica le informazioni raccolte, sia di utilizzare le stesse a supporto di una guida per i comuni potenzialmente interessati all'implementazione del teleriscaldamento, come complemento o alternativa alle tecnologie con caldaia a gas naturale o ad altri combustibili o al riscaldamento/ raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria mediante pompe di calore o l'impiego di energia elettrica.

Tra gli aspetti interessanti emersi dall'indagine, si rileva un complessivo interesse al teleriscaldamento, seppur talvolta a livello puramente teorico. La proprietà è in circa un quarto dei casi dell'ente, negli altri casi di soggetti partecipati dal comune o completamente indipendenti, che è poi l'opzione più diffusa. Sulla gestione della rete si rileva un unanime consenso verso l'attribuzione della stessa non direttamente all'ente, bensì a società partecipate o, più di frequente, a soggetti terzi privati.

La valorizzazione delle risorse locali e la possibilità di avere un quadro legislativo chiaro e coerente sono segnalati come presupposti necessari per iniziative del genere. Uno degli aspetti critici segnalati in tema di incoerenza legislativa è la mancata attuazione del fondo di garanzia dedicato previsto dal D.Lgs. 28/11, considerato un importante driver per il teleriscaldamento, ma mai reso operativo (tale dotazione è confluita, in accordo al D.Lgs. 102/14, in un nuovo fondo più ampio per l'efficienza energetica, con un ulteriore slittamento dei tempi).

Circa la metà degli impianti adotta, o ritiene adotterà, la tecnologia cogenerativa, che va nell'ottica di una ottimizzazione della generazione; il combustibile predominante è il gas naturale.

È stata condotta quindi un'analisi di tre reti di teleriscaldamento. Le reti e, più in generale, le centrali di produzione connesse, appartengono alla Società Teleriscaldamento-Cogenerazione Valcamonica, Valtellina, Valchiavenna (TCVVV) spa; gli impianti considerati, alimentati da biomassa legnosa e localizzati nella provincia di Sondrio, sono stati:

- l'impianto di Tirano, un comune con circa 9.240 residenti situato a 441 metri sul mare e in fascia climatica E; l'impianto si compone di tre caldaie a biomassa, due delle quali di potenza 6 MW e una di potenza 8 MW, e di un'ulteriore caldaia a gasolio di riserva, della potenza di 6 MW. La capacità di stoccaggio della biomassa è di 36.000 m^3;
- l'impianto di Sondalo (SO), un comune con circa 4.100 abitanti situato a 939 metri sul mare e in fascia climatica F. L'impianto è costituito da due caldaie a biomassa di potenza 6 MW ciascuna, con una caldaia a gasolio di riserva, della potenza di 6 MW. La capacità di stoccaggio della biomassa è di 9.000 m^3.
- l'impianto situato nella frazione di Santa Caterina nel Comune di Valfurva (SO), che serve circa 200 residenti ed è situato a 1.738 metri sul mare in fascia climatica F. L'impianto si compone di due caldaie a biomassa di potenza 6 MW ciascuna con una caldaia a gasolio di riserva, della potenza di 6 MW. La capacità di stoccaggio della biomassa è di 9.000 m^3. L'impianto, a fronte di una basso numero di residenti, alimenta numerose strutture alberghiere.

L'analisi di tali impianti si è svolta prendendo come riferimento dei periodi caratteristici e ha portato a individuare sulla base di reali condizioni di esercizio ulteriori punti di forza e debolezza del teleriscaldamento nel suo complesso. I risultati, elaborati e riportati in forma grafica, forniscono le basi per attuare possibili criteri di ottimizzazione energetica degli impianti stessi.

Si è ritenuto infine, in base alle analisi condotte e alla luce delle risultanze scaturite dai contatti avuti con energy manager e stakeholder del settore, individuare le principali barriere allo sviluppo del teleriscaldamento: barriere istituzionali, economico-finanziarie, energetiche, tecnologiche e legate al clima.

Dall'analisi dello stato dell'arte, dai risultati dell'indagine rivolta agli EM e dei dati di funzionamento degli impianti esaminati, si rileva che il teleriscaldamento può essere considerato una soluzione matura dal punto di vista tecnologico ma non ancora (per lo meno non sempre) da quello progettuale, per la difficoltà di prevedere la domanda e l'espansione futura della rete; è anche emerso che il teleriscaldamento gode di un certo interesse e di

possibilità di espansione nelle fasce climatiche E ed F. Si rileva anche la mancanza di una normativa chiara e organica e in alcuni casi l'attuazione dei provvedimenti previsti (in particolare la mancata attuazione del fondo dedicato al teleriscaldamento previsto dal D.Lgs. 28/11). Accanto a questo si rilevano notevoli agevolazioni dal punto di vista fiscale che contribuiscono alla sostenibilità finanziaria degli impianti.

Valutate le varie opzioni si ritiene che reti di teleriscaldamento alimentate da combustione di biomasse o da recuperi da effluenti da impianti industriali, eventualmente integrati con solare termico e con il ciclo dei rifiuti, possano essere soluzioni tecnicamente operanti, che, se ben dimensionate, valorizzano le risorse locali, promuovono l'occupazione qualificata e riducono la dipendenza dalle importazioni di fonti energetiche. La replica di questi impianti non è certamente automatica, per cui c'è bisogno di azioni per la promozione dell'imprenditoria e per la ricerca dei finanziamenti.

L'attività svolta nel quadro della collaborazione con la FIRE è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/132.

Sviluppo di una metodologia per il labelling energetico di componenti trasparenti per l'involucro edilizio, lucernari e infissi

Lo sviluppo di nuove tecnologie che possano essere integrate in strutture edilizie esistenti e che mirino a ridurre l'impatto sul consumo di energia durante il proprio utilizzo sono ormai temi contemplati e normati nel quadro di armonizzazione istituito dall'Unione Europea.

In particolare, in relazione a quanto previsto dalla Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica e dal D.L. 104/2012, il lavoro svolto in collaborazione con l'associazione di categoria ZENITAL ha consentito di sviluppare una metodologia per la valutazione e la definizione delle prestazioni energetiche dei componenti trasparenti per le coperture degli edifici, idonee alla identificazione di un labelling energetico di cupole e lucernari.

La metodologia, definita in riferimento al quadro normativo vigente, considerando le caratteristiche tipologiche edilizie del parco immobiliare esistente e delle zone climatiche in cui è suddiviso il territorio nazionale, ha permesso di condurre un'attenta analisi delle tipologie di componenti e sistemi trasparenti idonei al raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico e di confort ambientale attesi secondo normative vigenti.

Dettagli sul lavoro svolto sono contenuti nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/124.

b.2 Analisi

Analisi delle barriere che ostacolano l'accesso, da parte dei Comuni italiani, ai fondi disponibili a livello europeo e locale a supporto degli interventi di efficienza energetica nella PA

Lo studio, condotto in collaborazione con il Politecnico di Milano, ha analizzato le barriere che ostacolano l'accesso, da parte dei Comuni italiani, ai fondi disponibili a livello europeo e locale per gli interventi di efficienza energetica. Si analizzano quindi i principali strumenti disponibili per la realizzazione di questi interventi, promossi sia a livello italiano (Fondo nazionale per l'efficienza energetica, Decreto "Ambiente Protetto", Garanzia della Cassa Depositi e Prestiti, Programma Operativo Interregionale Energia, Conto Energia Termico, Titoli di Efficienza Energetica) che a livello europeo (European Energy Efficiency Fund, European Local ENergy Assistance, Mobilising Local Energy Investments - Project Development Assistance, Horizon 2020, The European Structural and Investment Funds, Debt for Energy Efficiency Projects Green, Joint European Support for Sustainable Investment in City Areas), per comprenderne il grado di utilizzo da parte dei Comuni italiani.

Lo studio ha sviluppato una serie di proposte di strumenti ed approcci che consentono di mitigare queste barriere e di favorire un maggior ricorso da parte dei Comuni a questi strumenti di natura finanziaria e di garanzia.

E' stato innanzitutto realizzato un quadro completo degli strumenti disponibili a livello europeo e locale per supportare gli investimenti in efficienza energetica dei Comuni italiani. Per ciascuno strumento sono stati evidenziati le modalità con cui il contributo viene erogato, i requisiti fondamentali per beneficiarne e le procedure di accesso. E' stata anche effettuata una valutazione degli impatti positivi, in termini energetici ed ambientali, per il sistema italiano della PA che un ricorso più ampio a questi fondi consentirebbe di ottenere.

Si è proceduto quindi a realizzare una serie di casi di studio ed interviste ad un campione analiticamente rappresentativo di Comuni italiani, con l'obiettivo di evidenziare quali siano le ragioni che rendono complesso per i Comuni accedere a questi sistemi di supporto all'efficienza energetica. Ci si è concentrati in particolare sull'analisi delle difficoltà associate alla costituzione di Consorzi tra Comuni o di altre forme di aggregazione, che sono spesso un requisito essenziale per poter beneficiare dei suddetti meccanismi di finanziamento.

Si è proceduto quindi a sviluppare una serie di proposte di miglioramento che, in base alle evidenze raccolte ed alle interviste effettuate, consentano di agevolare la partecipazione dei Comuni italiani a queste opportunità di finanziamento. Le proposte sviluppate sono state condivise con il *panel* di *key informants* intervistati ed hanno esplicitato le azioni concrete che il legislatore dovrebbe attuare per rendere più efficaci i meccanismi di aggregazione tra Comuni attualmente in uso rispetto al ricorso a questi strumenti di finanziamento. L'analisi dei meccanismi di aggregazione e le proposte di miglioramento si sono articolati su vari livelli, considerando aspetti di *governance*, elementi operativi e di natura contrattuale.

Lo studio si è basato su una metodologia mista, che ha combinato interviste dirette a *key informants*, simulazioni, analisi di scenario e *what-if*, consultazione di basi di dati pubbliche o ad accesso riservato, *desk research* sulla documentazione riguardante i meccanismi di finanziamento e garanzia a supporto degli interventi per l'efficienza energetica e le modalità di aggregazione attualmente disponibili per i Comuni italiani.

I risultati della ricerca sono presentati in un formato idoneo per conseguire un duplice obiettivo informativo. Da un lato, s'intende rendere i funzionari dei Comuni che si occupano di efficienza energetica consapevoli dei benefici derivanti da un ricorso agli strumenti di finanziamento e dei loro meccanismi e procedure di funzionamento. Dall'altro lato, si vuole fornire al *policy maker* delle indicazioni, basate sull'analisi empirica della realtà dei Comuni italiani, su come possano essere innovati i meccanismi di aggregazione in una direzione tale da massimizzare le loro capacità di sfruttare gli strumenti di finanziamento disponibili oggi e nei prossimi anni, a livello europeo ed italiano.

Le attività descritte sono dettagliatenel rapporto RdS/PAR2013/112.

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

Il sistema informativo del CRESME sui consumi energetici degli edifici pubblici è composto da un data base 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.

Il data base sui consumi energetici delle scuole pubbliche

Il data base 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 data base del 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 un'analisi immediata. E' composto da due distinti data base:

- 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 superfice complessiva dell'edificio; consumi elettrici e termici annui (kWh e euro ove disponibili); consumi per alunno; consumi specifici (kWh/m^2); tipologia degli impianti di riscaldamento e raffreddamento; combustibile utilizzato (metano, gasolio, teleriscaldamento, ecc); tipologia edilizia dell'edificio (cemento armato, muratura, prefabbricato, ecc.).

- 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 data base sui consumi energetici degli edifici pubblici ad uso ufficio

Il data base 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 data base di Access 2010 (con eventuale maschera di report) o in file Excel 2010 (con annesso eventuale foglio di report, ad esempio, tabelle pivot).

Dettagli sul lavoro svolto sono contenuti nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/126.

Linee guida per l'Energy Performance Contract, coerente con la Direttiva 27/2012/UE, da utilizzare dalle PA

Sono state sviluppate e predisposte le linee guida per l'EPC tenendo a riferimento quanto indicato nel D.Lgs 102/2014 di recepimento della direttiva 2012/27/UE. Il contratto EPC è definito dalla Direttiva come "l'accordo contrattuale tra il beneficiario e il fornitore di una misura di miglioramento dell'efficienza energetica, verificata e monitorata durante l'intera durata del contratto, laddove siano erogati investimenti (lavori, forniture o servizi) nell'ambito della misura in funzione del livello di miglioramento dell'efficienza energetica stabilito contrattualmente o di altri criteri di prestazione energetica concordati, quali i risparmi finanziari".

L'obiettivo, nella definizione delle linee guida per i contratti EPC, è stato quello di fornire un facile e veloce strumento di uso e consultazione sia per l'esperto dirigente pubblico, cui è affidato il compito di approntare e gestire i contratti di rendimento energetico, sia per l'amministratore pubblico cui è demandata la scelta politica dell'attivazione di tali contratti.

La difficoltà di questo approccio consiste nella natura atipica dei contratti EPC e nel fatto che tali contratti sono altamente tecnici, dove ai contenuti giuridici (garanzie, foro competente, norme di sicurezza ecc.) si affiancano sia contenuti economici (modalità di finanziamento, calcolo delle prestazioni, ecc.) sia contenuti altamente ingegneristici (diagnosi energetica, interventi di riqualificazione edilizia ed impiantistica).

Alla luce di quanto sopra, nelle linee giuda si è proposta una struttura di contratto, ove possibile, caratterizzata per materia. Si è cercato di articolare le disposizioni contrattuali con una struttura il più semplice possibile i cui contenuti dovranno avere il pregio di essere facilmente consultabili e comprensibili anche ai non addetti ai lavori. Tale documento è oggetto di una serie di confronti con Istituzioni e Associazioni di categoria a seguito dei quali sarà definito con il Ministero dello Sviluppo economico la stesura definitiva. Per questo motivo il documento sarà reso disponibile alla fine di tale procedura.

L'attività svolta è riportata nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/127.

Intervento dimostrativo di riqualificazione energetica in un edificio pubblico con destinazione d'uso scolastico.

L'attività, svolta in collaborazione con CITERA e avviata nel precedente PAR, nella presente annualità è stata finalizzata alla realizzazione di una progettazione esecutiva degli interventi di efficientamento energetico di un edifico scolastico particolarmente esemplificativo della realtà presente nella Provincia di Roma. L'edificio di riferimento è stato preliminarmente concordato con la Proprietà Pubblica della Provincia di Roma ed è l'Istituto Tecnico Commerciale A. Genovesi in via Venezuela, 43 a Roma; la scuola edificata alle pendici di Villa Glori, occupa un contesto a bassa densità edilizia, di particolare pregio ambientale e di pregio urbano perché l'area è limitrofa all'Auditorium, Parco della Musica.

L'edificio pilota è stato scelto, oltre che per le caratteristiche tecnologiche di impianti e materiali adottati, comuni alla più alta percentuale del parco scolastico immobiliare appartenenti alla Provincia di Roma, anche per la particolare morfologia architettonica Il lotto ha superficie di 3085 mq. La superficie calpestabile esterna che circonda l'intero edificio è 1349 m^2 e si compone di uno spazio non interamente pavimentato e con alcune alte

alberature su terreno incolto la cui superficie occupata è 560 m^2. L'edificio si sviluppa un piano fuori terra e non presenta piani interrati o seminterrati.

La riqualificazione energetico-ambientale è determinata dalla caratterizzazione del sistema edificio-impianto dovuta alla configurazione spaziale dei tre corpi isorientati e di quasi simile superficie e cubatura. La suddetta configurazione consente una sperimentazione di interventi, con soluzioni integrate e differenziate per ciascuno dei corpi dell'edificio, comparando in tempo reale l'elaborazione dei bilanci energetici in base ai dati di riferimento, in relazione alle tecnologie per ciascuna delle singole applicazioni.

Dal punto di vista del monitoraggio, si ha la possibilità di verifica contemporanea, nel medesimo edificio, delle potenzialità di utilizzo di applicativi tecnologici di nuova generazione presenti sul mercato nazionale ancora in fase di sperimentazione.

Le azioni sull'involucro opaco e trasparente prevedono interventi di manutenzione straordinaria per il controllo della dispersione di calore invernale e delle rientrate estive, mediante revisione dell'architettura esterna con l'integrazione di sistemi tecnologici attivi e passivi con assemblaggio a secco per facilità di manutenzione, durante la fase di utilizzo e per facilità di dismissione nella fase di dismissione. I campi delle azioni riguardano:

- tecnologia impiantistica: termo - igrometrica, acustica, illuminotecnica
- installazione sistema di controllo BEMS per il controllo di apporti energetici da tecnologia verde, dei consumi energetici e della sicurezza
- sfruttamento degli apporti solari gratuiti con tecnologie passive e attive
- utilizzo di componenti edilizi derivanti da materie prime secondarie, basso emissivi, riciclabili e isolanti
- aumento del valore commerciale dell'edificio
- aumento del livello di soddisfazione e partecipazione diretta da parte dei fruitori dei servizi

Poiché le condizioni di orientamento e giacitura non sono modificabili, in quanto trattasi di edificio già realizzato, si prevede lo sviluppo del piano di azione per la manutenzione straordinaria, necessario all'ottimizzazione dei valori dell'efficienza energetica. È previsto l'isolamento termo-igrometrico e quindi acustico per tutte le pareti di confine, al fine di favorire il ritardo del flusso di calore per avere superfici calde durante la stagione invernale e viceversa, superfici più fresche durante la stagione estiva. L'intervento di riqualificazione dell'efficientamento energetico mira anche ad adottare un largo utilizzo di *cool materials* ad alto impatto, ovvero materiali ad alta riflettanza solare ed emissività termica nell'infrarosso, contribuendo così, tramite il minore scambio termico tra superfici ed aria esterna, alla riduzione della temperatura esterna.

La soluzione impiantistica individuata fa riferimento ad un impianto costituito da un sistema di generazione di energia elettrica e termica da fonte solare e da un sistema di climatizzazione a pompa di calore che sfrutta la fonte geotermica mediante apposite perforazioni verticali realizzate all'interno dell'area di competenza.

Si può evidenziare come l'insieme degli interventi proposti (in grado di portare l'edificio da classe energetica G a classe energetica B) abbia un costo parametrico complessivo dell'ordine dei 1000 €/m^2 abbastanza equamente suddiviso tra interventi edili ed interventi impiantistici. Infatti al termine dello sviluppo del progetto esecutivo sono stati valutati in dettaglio i costi relativi all'intervento attraverso la produzione dei Computi Metrici Estimativi riportati in dettaglio in elaborati dedicati. Il costo totale di efficientamento dell'intero edificio è di 993.010,86 €, mentre il costo di efficientamento di un blocco tipo è stato valutato pari a 340.797,29 € e tale informazione può essere particolarmente rilevante qualora si decida di intervenire secondo step successivi.

Per quel che riguarda la tempistica dell'intervento all'interno del piano di sicurezza e coordinamento è stato prodotto un crono programma dei lavori. La durata complessiva dei lavori è stata valutata nell'ordine dei 120 giorni lavorativi, che può essere ridotta a 100 nel caso di intervento relativo ad un solo blocco .

Nell'ottica globale dell'incremento della sostenibilità ambientale relativa al comparto edilizio, il progetto di riqualificazione proposto è stato valutato non solo nell'ottica dell'efficienza energetica, ma in quella più ampia della certificazione ambientale, mediante la redazione delle schede inserite nel Protocollo Itaca nazionale relativo agli edifici scolastici recepito di recente dalla Regione Lazio. Come ulteriore approfondimento delle tematiche ambientali è stata svolta anche un'analisi mediante lo strumento del LCA degli impatti relativi all'intero ciclo di vita dei principali componenti innovativi utilizzati, posti a confronto con quelli tradizionalmente impiegati in edilizia e negli impianti tecnologici.

A completamento del progetto esecutivo sono stati fornite anche relazioni tecniche dettagliate, schede tecniche dei materiali e delle tecnologie utilizzate, capitolati speciali di appalto e capitolato tipo per l'efficientamento energetico di tutto il patrimonio scolastico facente capo alla provincia di Roma.

Dettagli sul lavoro svolto sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/128 e relativi allegati.

c. Proposta di applicazione dell'Indice di Severità Climatico per la zonizzazione estiva

Definizione delle zone climatiche estive e della durata della stagione di climatizzazione estiva per gli edifici residenziali nel territorio italiano attraverso la metodologia dell'indice di severità climatica

Il lavoro svolto s'inserisce nell'ambito del supporto istituzionale dell'ENEA al Ministero dello Sviluppo Economico per la preparazione dei decreti di attuazione della direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica negli edifici (recepita dalla L.90-2013) e, in particolare, sulle modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e l'utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici nonché dell'applicazione di prescrizioni e requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari. In questo nuovo contesto è previsto il calcolo del fabbisogno energetico annuale globale per singolo servizio energetico, espresso in energia primaria. Accanto alle prescrizioni riguardanti il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale, dovranno quindi essere considerati, per esempio, il fabbisogno per il raffrescamento estivo e per l'illuminazione artificiale. Mentre per il fabbisogno invernale è da tempo vigente una divisione in zone climatiche del territorio nazionale e la determinazione della durata del periodo annuale legale di funzionamento dell'impianto termico (DPR 412/93), per il periodo estivo, a livello normativo o legislativo, niente di tutto questo ancora esiste. Su proposta dell'ENEA, però, è stato recepito nella norma di prossima pubblicazione UNI 10349 parte 3 un nuovo parametro, l'indice di Severità Climatica, sulla base del quale è possibile una zonizzazione climatica estiva del territorio nazionale. Nel lavoro svolto nella precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico [rapporto RdS/2013/154], è già stata riportata una proposta di zonizzazione estiva basata su tale indice.

Nel presente lavoro è rivista la metodologia di zonizzazione al fine di "ponderare" la zona climatica di attribuzione di ogni singola località con la superficie abitativa media della località stessa; la nuova zonizzazione è quindi dipendente dall'intensità energetica connessa con la parte di territorio interessato. È altresì proposto un metodo, del tutto originale e ancora basato sull'Indice di Severità Climatica, per la determinazione del tempo d'inizio e fine legale della stagione di raffrescamento, in modo da completare il parallelo con il periodo invernale, che si propone di inserire nei decreti attuativi in preparazione.

L'attività svolta è dettagliata nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/129.

d. Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologiche

Eco-Greenroof & Vertical Greenery System. Validazione di modelli semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari con l'ENEA hanno riguardato attività connesse con la realizzazione di una prova sperimentale presso il centro didattico sperimentale "Martucci" della stessa Università. Sono stati realizzati tre prototipi di parete di edificio in scala ricoperti due con rampicanti sempreverdi (Pandorea jasminoides variegata e Rhyncospermum jasminoides) e il terzo è stato usato come riferimento. Durante il periodo estivo, mediante un sistema costituito da data logger e sensori sono stati registrati: la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare incidente sulla superficie verticale, la velocità e la direzione del vento, la temperatura superficiale interna ed esterna della parete e la temperatura dell'aria nel volume delimitato dietro a ogni parete.

Dall'analisi dei dati ottenuti è risultato che nelle ore calde della giornata le temperature dell'intonaco esterno registrate per la parete verticale senza alcuna copertura vegetale sono risultate maggiori di circa 4 °C rispetto alle temperature dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per le pareti verticali ricoperte da Rhyncospermum jasminoides e Pandorea jasminoides variegata. L'onda termica si propaga con uno sfasamento di circa 2 ore all'interno dei volumi considerati.

I risultati ottenuti in campo sono stati utilizzati: nel modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo; per la valutazione del Green Factor "Kv" per descrivere il comportamento schermante delle due diverse essenze vegetali utilizzate nella prova sperimentale; per il dimensionamento di un sistema fotovoltaico che deve alimentare l'impianto di irrigazione di un edificio ricoperto con le stesse essenze vegetali usate nella prova sperimentale.

I risultati presentati riguardano solo il periodo estivo, la ricerca potrà eventualmente proseguire continuando a monitorare le pareti prototipo nell'intero arco dell'anno. Il modello energetico sarà verificato e applicato nelle diverse condizioni climatiche esterne, temperatura dell'aria e radiazione solare. Il modello, una volta testato sia per i periodi caldi che per quelli freddi, potrà servire per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di confort termico per le persone che usufruiscono dell'edificio.

L'attività svolta è descritta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/131.

Analisi del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde per ottimizzare l'efficienza energetica degli edifici in area urbana, rispetto alle aree climatiche italiane

Le simulazioni condotte attraverso il software EnergyPlus, su un edificio tipo di edilizia residenziale pubblica hanno consentito, al variare delle configurazioni di involucro, di valutare le variazioni del comportamento termico dell'involucro dell'edificio e le eventuali ricadute, in termini di comfort, sulle temperature degli ambienti interni.

Il software EnergyPlus consente di dettagliare con estrema precisione il complesso meccanismo di scambio di calore che avviene all'interno di un substrato vegetale quale quello del tetto verde, inclusi i meccanismi di scambio per evapotraspirazione, ma non è tuttavia dotato di un modulo specifico per il calcolo delle prestazioni delle pareti verdi: i risultati della presente ricerca possono quindi ritenersi indicativi, ma non validati, per quanto attiene ai dati relativi al comportamento della parete verde.

La variazione di comportamento energetico dell'involucro degli edifici tipo è stata valutata principalmente attraverso l'analisi delle temperature superficiali degli elementi di involucro, l'andamento dei flussi di calore superficiali sulle facce interne ed esterne degli elementi di involucro, la variazione della temperatura operativa all'interno degli ambienti. Le simulazioni hanno confermato il contributo offerto dai sistemi a verde nella riduzione dei carichi termici, con particolare rilevanza per le zone climatiche temperate in cui le oscillazioni della temperatura esterna e i livelli di irradianza non sono particolarmente rilevanti. Le simulazioni hanno altresì rilevato la significatività di alcuni parametri descrittivi della natura del manto vegetale, primo fra tutti il LAI (Leaf Area Index), nel condizionare il comportamento degli strati vegetali, in riferimento alla capacità di dispersione del calore accumulato. Tale parametro è da tenersi in debita considerazione nella progettazione di tetti verdi in climi in cui i livelli di irradianza e le temperature diurne sono elevate (zone climatiche A, B), onde evitare che la copertura non sia in grado di smaltire durante le ore fresche notturne il calore assorbito durante il giorno.

Dettagli sul lavoro svolto presso l'Università di Pisa sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/139.

Validazione di modelli di simulazione semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati dotati di coltri vegetali

L'attività di studio, ricerca e sperimentazione ha avuto come obiettivo generale l'individuazione e la definizione dei parametri biologici e dei substrati di coltivazione che definiscono la realizzazione di coltri vegetali per climi mediterranei. In particolare, sono stati realizzati una serie di prototipi di coperture verdi di tipo estensivo (substrati di altezza 6-12 cm) e intensivo leggero (altezza 18 cm) per la valutazione di parametri ambientali e flussi di calore utili alla predizione della capacità delle coltri vegetali di contribuire alla coibentazione naturale di edifici civili. Le coperture verdi sono state realizzate utilizzando piante tipiche dell'area mediterranea quali le specie aromatiche appartenenti alla famiglia delle Lamiaceae (prototipo intensivo leggero) e le specie succulente della famiglia Crassulaceae (prototipo estensivo). I prototipi sono stati installati sulla superficie aperta di un terrazzo del Centro ENEA Casaccia di Roma (42°04'N; 12°30'E).

Un sistema di monitoraggio costituito da un data logger alimentato elettricamente da un pannello solare è stato installato per raccogliere i dati climatici con frequenza oraria. Nei periodi di osservazione la temperatura atmosferica massima è risultata di 28 °C, mentre nell'intercapedine della copertura è stata rilevata una diminuzione di temperatura di circa 4-5 °C.

La sperimentazione ha preso in considerazione anche la valutazione di *biochar* naturale aggiunto ai substrati colturali soil-less per ottenere formulazioni caratterizzate da bassa densità con il fine di migliorare la crescita e la resistenza delle piante che costituivano la coltre vegetale. I dati microclimatici rilevati nelle strutture di coltivazione hanno evidenziato un effetto di mitigazione della temperatura per le coperture intensive leggere nelle ore estive in cui si riscontrava la più elevata temperatura atmosferica, mentre le misurazioni dei dati biologici hanno evidenziato un aumento della massa e delle capacità tappezzante di piante di *Sedum acre* e *Sedum reflexum* nei substrati che contenevano *compost* e inoculo a base di *endomycorrhizae*. Per quanto riguarda gli aspetti botanici, sono state valutate le capacità di crescita di una collezione di ecotipi spontanei ottenuti da piante raccolte in diversi ambienti mediterranei. Il lavoro ha permesso di individuare in alcuni ecotipi di specie di Crassulaceae (piante succulente), tipici di ambienti aridi, una forte capacità di adattamento in termini di crescita su substrati soil-less. Sulla base dei dati finora rilevati, attraverso l'attività di ricerca e sperimentazione finora effettuata, si ritiene che tali accessioni vegetali possano essere usate con successo in impianti di verde estensivo su terrazzi in climi mediterranei.

Dettagli sull'attività svolta sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/141.

Studio del comportamento radiativo e termico di componenti di involucro produttori di energia

Le attività di ricerca, svolte presso l'Università IUAV di Venezia, riguardano la caratterizzazione del comportamento radiativo e termico di componenti trasparenti di involucro produttori di energia con l'obiettivo di contribuire al miglioramento del comportamento energetico del sistema edificio impianto. I componenti trasparenti sono infatti un elemento fondamentale dell'involucro edilizio in grado di svolgere più funzioni contemporaneamente: ingresso di energia, ingresso di luce, visione del contesto ambientale esterno. L'innovazione tecnologica dei materiali permette attualmente di aggiungere anche una ulteriore funzione che è quella della produzione di energia ossia della trasformazione dell'energia radiante solare in energia elettrica e energia termica. Ciò risulta di notevole interesse in relazione alla necessità di realizzare entro pochi anni, sulla spinta della legislazione nazionale e europea, edifici che non consumino energia (Zero Energy Building ZEB) o che ne consumino molto poca (Near Zero Energy Building NZEB).

Si sono presi in esame elementi di involucro innovativi (attivi e passivi) e la loro integrazione nel bilancio energetico dell'edificio. Più specificamente nel campo del sistemi produttori di energia di tipo fotovoltaico integrati nell'involucro edilizio (Building Integrated PhotoVoltaic, BIPV) si è attuata una estesa indagine di mercato sulle diverse tipologie di prodotti è sulle loro caratteristiche. Si sono individuate le tecnologie più concretamente applicabili al momento attuale nel contesto della progettazione delle residenze e degli edifici del terziario.

Parallelamente si è svolta un'attività sperimentale e si sono predisposti alcuni campioni con la collaborazione dell'azienda UnionGlass di San Stino di Livenza (VE) e dell'ENEA Si è scelto di analizzare nel dettaglio un elemento BIPV composto dalle stratigrafie più diffuse sul mercato. Come mostrato in Figura 422 si tratta di un vetro laminato al cui interno viene inserito un strato di celle fotovoltaiche. Il sistema stratificato è stato inserito in una vetrocamera e si sono realizzati campioni corrispondenti alla condizione di riferimento completamente trasparente e a diversi livelli di copertura della parte trasparente da parte delle celle opache (40, 66 e 85%).

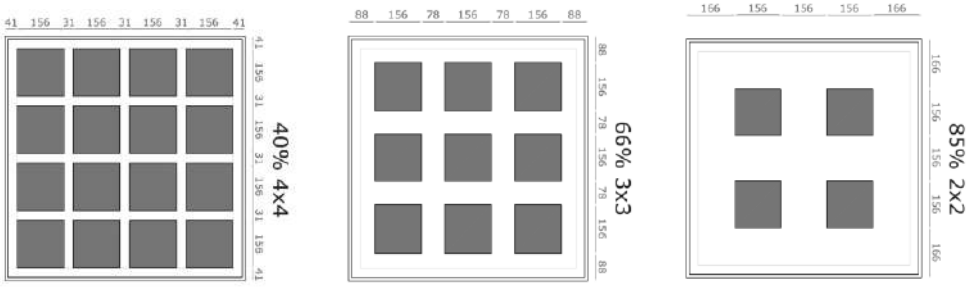


Figura 422. Schemi campioni realizzati con celle silicio amorfo interposte

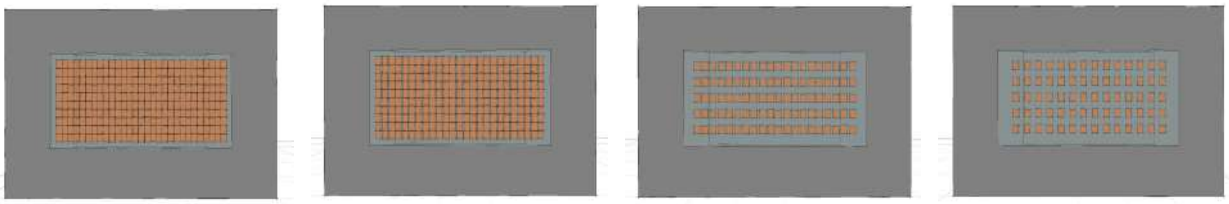
I campioni sono stati caratterizzati in laboratorio per determinarne le proprietà termo-fisiche. È stata determinata la trasmittanza termica e presso il Laboratorio Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE di Friburgo si è proceduto alla determinazione del fattore di guadagno solare. Infine le proprietà ottiche e radiative degli elementi dei sistemi studiati (coefficienti di riflessione, trasmissione ed assorbimento) sono state misurate, presso la Stazione Sperimentale del Vetro di Murano, attraverso analisi spettrale alle varie lunghezze d'onda.

Si è messo a punto un modello energetico dei componenti trasparenti fotovoltaici. Al fine stimare le caratteristiche ottiche e termiche dell'elemento BIPV si è effettuata una modellazione a nodi e sulla base di questa si e costruito un modello numerico le cui equazioni differenziali sono state risolte con la tecnica delle differenze finite. Per ogni nodo del modello, in rappresentanza di un volume finito di materiale, sfruttando l'analogia elettrica di un circuito RC, e stato calcolato un bilancio termico considerando l'interazione di quattro componenti principali sul nodo stesso:

- componente di radiazione Shortwave [SW]. è considerata l'interazione di tutta la banda elettromagnetica da 0,3 a 2,5 µm a rappresentare l'intero spettro solare secondo la norma EN 13363;
- componente di radiazione Longwave [LW]. Si e tenuta in considerazione la presenza della radiazione termica nel range di lunghezza d'onda tra 3 e 100 µm a rappresentare il lontano infrarosso secondo la norma EN 13363 2005;
- componente di conduzione [COND]. Si e considerato lo scambio termico per conduzione attraverso le lastre di vetro;
- componente di convezione [CONV]. Si e considerato lo scambio termico per convezione tra le lastre e gli ambienti adiacenti.

Sono state effettuate stime dei parametri di trasmissione solare e trasmittanza del modulo BIPV e i valori sono stati confrontati con i risultati sperimentali sintonizzando il modello numerico. Inoltre sono state eseguite ulteriori variazioni del coefficiente di trasmissione per poter valutarne l'influenza sui parametri termici ed ottici. La variazione del coefficiente di trasmissione, sia visibile che solare. Si è valutato il fattore solare e la trasmittanza. La variazione di frazione d'area libera del modello porta a notevoli variazioni sia per quel che riguarda il valore di SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) che per quel che riguarda il coefficiente di trasmissione visibile.

A partire dai dati ottenuti dalla misura sperimentale e dalla modellazione numerica per il singolo componente fotovoltaico integrato si è implementato un modello di simulazione di un edificio standard utilizzando il software EnergyPlus. Le prime analisi sono state fatte su un modello semplificato e rappresentante una stanza tipo con destinazione d'uso ad uffici e con una finestra esposta a sud con moduli BIPV a diverse frazioni di area libera de celle, (Figura 423).



[area libera 15%] [area libera 30%] [area libera 60%] [area libera 80%]

Figura 423. Schemi sistemi BIPV utilizzati nella simulazione energetica

Si sono valutati gli effetti della variazione di tipologia di BIPV, sul bilancio energetico dell'edificio. In particolare la dipendenza dei consumi di raffrescamento e riscaldamento rispetto alla variazione di area coperta da celle nel modulo BIPV, considerando che tale variazione porta ad una significativa modifica dell'energia elettrica prodotta dal modulo stesso. In questa prima fase la variazione di produzione del modulo è stata valutata in maniera inversamente proporzionale alla frazione d'area coperta dalle celle. In particolare i parametri utilizzati per la simulazione e per i quali è stata eseguita un'analisi di sensitività, sono stati: numero di celle in serie, area attiva, corrente di corto circuito, tensione a circuito aperto, corrente a potenza massima, tensione a potenza massima.

È stato modellato un edificio tipo con destinazione d'uso uffici con due configurazioni di Window to Wall Ratio (WWR) e con due tipologie di vetro. Nel primo caso con WWR pari al 10% è emerso come sia nel caso di vetro stratificato singolo che di vetro doppio, la percentuale d'area coperta da celle non influisca sul bilancio complessivo, ma cambi proporzionalmente la percentuale di energia prodotta e di conseguenza l'interazione con il fabbisogno complessivo. Si è visto come il modulo BIPV coprisse mediamente per circa l'11% il fabbisogno di energia elettrica totale. Nel caso di WWR pari al 30% il fabbisogno elettrico totale del volume tipo analizzato aumenta con l'aumentare dell'area libera di pannello, in entrambi i casi di vetro utilizzato, e di conseguenza appare più utile mantenere basse percentuali di area libera per permettere ai moduli BIPV integrati nelle finestre di poter arrivare a coprire mediamente fino a circa il 20% del fabbisogno elettrico totale.

Dettagli sui risultati dello studio sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/140.

Comparazione tra standard e strumenti di calcolo per le prestazioni solari e luminose di componenti vetrati con accoppiamento di schermature solari

Le schermature solari sono una delle più importanti tecnologie per l'efficientamento energetico dell'involucro edilizio. I motivi sono: riscaldamento globale, innalzamento dei consumi per la climatizzazione estiva (prevalentemente elettrica degli edifici), utilizzo sempre maggiore di materiali trasparenti che richiedono una protezione addizionale dell'ambiente costruito. Nell'ottica di edifici a consumo quasi zero, sarà dunque necessario equipaggiare gli involucri con prodotti di protezione solare sempre più performanti e, di conseguenza, appare necessario disporre di strumenti che siano in grado di predire in modo accurato la risposta termica, energetica e luminosa dei sistemi semitrasparenti. Software quali: Winshelter, sviluppato nelle precedenti annualità della RdS, Window e Wis, eseguono i calcoli necessari, basandosi su un set di norme europee ed internazionali.

L'attività focalizza l'attenzione sulle diverse modalità di calcolo, in particolare sull'utilizzo dei dati spettrali per i sistemi vetrati e le schermature, ponendoli in confronto con l'utilizzo dei dati integrati. La selettività spettrale è un tema importante per i materiali semitrasparenti ad elevate prestazioni e, per tale ragione, è rilevante confrontare i due modelli di calcolo, anche ai fini di un eventuale schema di classificazione ed etichettatura energetica. Il confronto tra i diversi modelli e software è eseguito in funzione di un serie di variabili: caratteristiche dei

componenti vetrati, natura (tende e lamelle) e caratteristiche delle schermature solari, caratteristiche dell'intercapedine, spettri di integrazioni di riferimento. Sono stati analizzati inoltre limiti e vantaggi delle diverse soluzioni, con la proposta conclusiva di un sistema di classificazione energetica.

L'attività è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/143.

e. Sviluppo, sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (Cool materials)

Valutazione parametrica delle prestazioni dell'involucro edilizio semitrasparente per illuminazione artificiale e climatizzazione estiva nel contesto Italiano

Le parti trasparenti dell'involucro edilizio permettono di modulare il flusso energetico e luminoso. Il grado di controllo dipende dall'adattabilità del sistema vetrazione unitamente alla protezione solare. L'obiettivo primario di questa attività è la determinazione dell'efficacia energetica, Al variare dell'energia e del contesto, di alcune tipologie di sistemi di controllo solare. I sistemi esaminati appartengono alle seguenti categorie:

- schermo continuo parallelo al piano di facciata permeabile all'aria con geometria (micro-geometria) mono e bidirezionale (reti e maglie metalliche);
- schermo continuo parallelo al piano di facciata tessile caratterizzato da una trama e da un ordito (tende);
- schermo discontinuo formato da elementi orientabili a giacitura orizzontale e verticale di varie dimensioni (lamelle e veneziane).

La trattazione e l'analisi dettagliata del profilo prestazionale caratteristico viene eseguita sulle maglie e sulle reti metalliche. I sistemi tradizionali sono considerati solo come riferimento, poiché sono sistemi noti, per i quali esiste già una letteratura specifica.

L'efficacia dei sistemi di protezione solare viene definita riguardo al fabbisogno di climatizzazione e l'illuminazione di un ambiente di riferimento, riportato convenzionalmente a energia primaria, e in relazione ad una serie di variabili quali: la latitudine, la dimensione e l'orientamento della specchiatura trasparente, le proprietà energetiche della vetrazione, la geometria del sistema di controllo solare e le caratteristiche ottiche e i modi di attivazione (in continuo o statico) del sistema di controllo solare.

Nello specifico obiettivi dell'attività sono di:

- definire, per alcune tipologie di schermatura, un profilo prestazionale caratteristico (τ_{SOL} angolare) al variare della geometria del sistema;
- determinare, per un campione di riferimento (GRID), una funzione previsionale per la stima del comportamento del componente (τ_{SOL} media giornaliera mensile) al variare della sua geometria, della latitudine e dello orientamento;
- correlare il peso e l'efficacia delle variabili fisiche del sistema schermante (geometria e proprietà ottico-radiative) con le variabili geometriche e prestazionali dell'involucro (WWR, Window to Wall Ratio; g-value; U-value).

Ad una prima definizione dell'ambiente di riferimento per le modellazioni e una definizione delle condizioni al contorno, delle variabili di sistema schermante o di involucro e delle strategie di controllo (criteri di attivazione del sistema schermante- fisso, mobile in continuo e on-off- e del sistema di illuminazione), è seguita l'attività di analisi dei casi (2365 modellazioni) che ha contribuito a determinare l'efficienza energetica della protezione solare. Tutte le modellazioni sono state effettuate mediante software EnergyPlus. Le variabili considerate sono:

- l'orientamento (est, sud, ovest) e la localizzazione geografica (Milano, Roma, Palermo);
- WWR (17, 33 e 100%);
- U-value, g-value e τ_{vis} vetrazione;
- la geometria (V/P, rapporto vuoto pieno), riflettanza ed emissività dei materiali, posizionamento e inclinazione del sistema di schermatura;
- la strategia di controllo della schermatura, dove previsto (500 lux sul piano di lavoro per attivazione).

Il grafico riportato in Figura 424, a titolo esemplificativo, restituisce l'efficacia delle schermature per WWR. Dettagli sull'attività e sui risultati ottenuti sono riportati nel rapporto RdS/PAR2013/142.

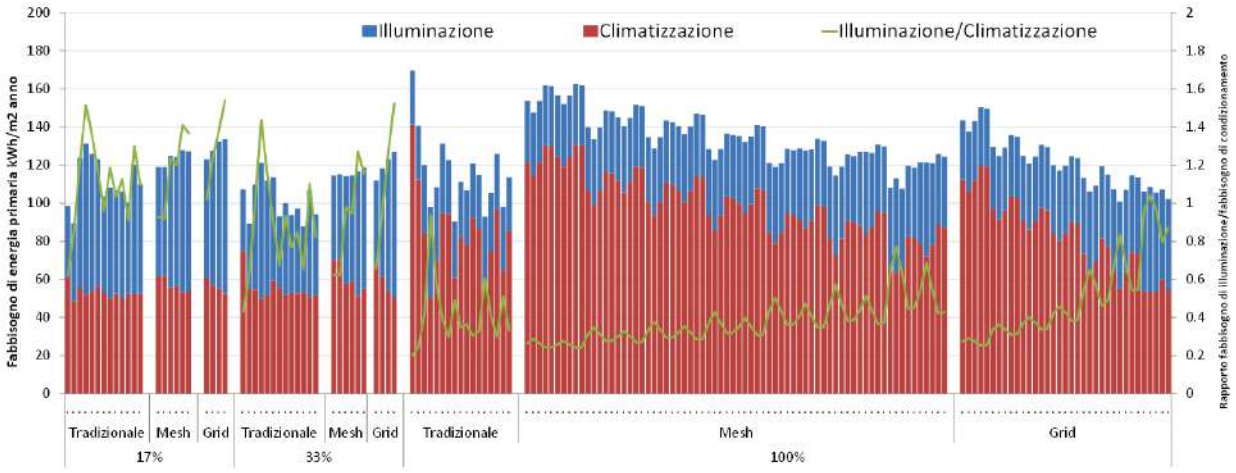


Figura 424. Variazione del fabbisogno energia primaria per climatizzazione e di lluminazione al variare dei sistemi di controllo solare e del tipo di attivazione per Roma, orientamento sud

Caratterizzazione dei cool material per le chiusure verticali dell'involucro edilizio

Sono definiti "cool material" i materiali caratterizzati da elevata riflettenza solare, ottenuta attraverso l'utilizzo di tinte chiare (tipicamente il bianco) o con colori più scuri, trattati però con speciali pigmenti riflettenti all'infrarosso vicino, che aumentano la riflettenza nel vicino infrarosso mantenendo la risposta cromatica desiderata. L'elevata riflettenza permette di limitare l'innalzamento della 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. In entrambi i casi i "cool materials" rappresentano una strategia importante per mitigare due fenomeni che influenzano negativamente la qualità ambientale ed energetica delle città nei climi temperati: l'incremento dei consumi energetici e l'effetto isola di calore urbana.

I "cool material" utilizzati come rivestimento per i tetti, i "cool roof", sono stati studiati e testati negli ultimi anni e sono ora considerati una tecnologia efficiente e matura per molte tipologie di edifici in differenti climi. Tuttavia, il crescente aumento dei consumi per la climatizzazione estiva e l'obiettivo a breve scadenza di edifici a consumo quasi zero, suggeriscono l'adozione di tecnologie *cool* in tutti quei casi in cui il raffrescamento gioca un ruolo fondamentale nel bilancio energetico degli edifici.

Da questo punto di vista si è esplorata la possibilità di sviluppare e testare "cool materials" per facciate: diverse tinte e colorazioni sono state prodotte e caratterizzate. A partire dai dati sperimentali è stata poi eseguita un'analisi energetica sull'impatto di facciate cool sul bilancio complessivo di edifici residenziali. Analisi di fabbisogno energetico e di comfort termico in edifici non climatizzati sono state condotte per un edificio residenziale di riferimento, considerando le seguenti variabili: livello di isolamento, zona climatica, riflettenza delle pareti, condizioni operative indoor. Lo studio ha consentito di esplorare potenzialità e limiti della tecnologia, fornendo indicazioni sulle condizioni più favorevoli per l'adozione di involucri ad elevata riflettanza solare.

La ricerca ha evidenziato come la tecnologia presenti delle interessanti prospettive in termini di miglioramento della risposta alla radiazione solare soprattutto per i colori scuri. Gli incrementi di riflettanza solare sono invece molto più modesti nel caso di colori chiari, laddove già si registra un buon comportamento sullo spettro dell'infrarosso vicino. Dal punto di vista dell'impatto sull'edificio, lo studio evidenzia notevoli potenzialità di risparmio energetico per quanto riguarda la stagione estiva per tutte le zone climatiche testate. Viceversa su base annuale i vantaggi, peraltro modesti, sono invece registrati nelle zone più calde di Italia o in condizioni climatiche decisamente più severe di quelle riscontrabili alle nostre latitudini.

Dettagli sul lavoro svolto sono riportati nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/144.

Valutazione parametrica delle prestazioni dell'involucro edilizio semitrasparente nel contesto italiano

I materiali utilizzati per la costruzione di edifici e per la pavimentazione stradale sono generalmente caratterizzati da una riflessione della radiazione solare di tipo diffuso. Questa caratteristica permette di considerare i loro valori di riflettanza, e quindi di assorbanza, praticamente costanti al variare dell'angolo di incidenza di un fascio

luminoso che li colpisce. D'altra parte questa assunzione non è valida per materiali che presentano riflessioni regolari (speculari) che seguono la legge teorica di Fresnel, come per esempio vetri o superfici lucidate, nei quali il potere di riflessione del materiale e strettamente dipendente dall'angolo di incidenza.

I cool materia, usati come rivestimento per gli edifici, sono caratterizzati da un'elevata riflettanza solare e da un'elevata emissività termica. Riflettere la maggior parte della radiazione solare significa creare dei profili di temperatura superficiale nell'arco della giornata sensibilmente più bassi rispetto a quelli che generalmente sono misurati per i materiali convenzionali. Per questo motivo essi rappresentano un'efficiente soluzione sia per diminuire la temperatura all'interno degli edifici migliorando il comfort, sia, come dimostrato da alcuni studi, per mitigare la temperatura dell'ambiente esterno, se utilizzati su scala urbana come tinte per asfalti e calcestruzzi.

Questo studio è finalizzato a dimostrare la dipendenza della riflettanza solare dall'angolo di incidenza tramite analisi sperimentali. I materiali selezionati per l'analisi sperimentale sono quattro tipici materiali da costruzione utilizzati per il rivestimento dei tetti con finitura superficiale diversa per esaminare come essa influenzi la forma della riflettanza direzionale emisferica.

Sono state condotte analisi goniofotometriche qualitative volte a valutare la distribuzione angolare del potere di riflessione attraverso la misura del coefficiente di luminanza/radianza o BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) e analisi spettrali. Quest'ultima tipologia di misurazioni è stata condotta attraverso un banco ottico sperimentale equipaggiato con una sfera integratrice di 75 cm di diametro necessaria per la misura della riflettanza spettrale di materiali con componenti diffuse a diversi angoli di incidenza del fascio generato dalla sorgente luminosa.

A partire dai risultati sperimentali è stato possibile costruire una funzione matematica mediante interpolazione "spline" che collegasse il valore di riflettanza solare all'angolo di incidenza. La suddetta funzione è stata poi inserita all'interno di un software dinamico di modellizzazione energetica al fine di calcolare alcuni parametri fisici delle superfici esterne (carichi solari e flussi energetici di dispersione) di un edificio di riferimento posto a tre diverse latitudini relative a tre città italiane: Milano, Roma e Palermo.

Si è poi proceduto a confrontare i risultati ottenuti dall'analisi numerica con quelli ottenuti con il metodo semplificato, presente nella maggior parte dei software di calcolo energetico, che considera la riflettanza di un materiale indipendente dall'angolo di incidenza (materiale con riflessione lambertiana e quindi perfettamente diffondente). Il confronto ha dimostrato come il metodo di calcolo che considera la riflettanza costante sovrastimi il potere di assorbimento solare delle superfici. I carichi solari, ottenuti con il metodo a riflettanza dipendente dall'angolo di incidenza introdotto in questo studio, risultano essere, in alcuni casi, anche inferiori del 17% rispetto al metodo di calcolo a riflettanza costante e sono state rilevate variazioni dei flussi di dispersione termica maggiori del 7% per superfici con esposizione sud ed orizzontali.

Il metodo proposto ha quindi messo in evidenza i limiti relativi al calcolo degli apporti solari dei modelli termo-fisici generalmente utilizzati per condurre analisi energetiche su scala di edificio.

L'attività condotta nel quadro della collaborazione con l'Università di Roma Tre è descritta nei dettagli nel rapporto RdS/PAR2013/145.

Utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'Efficienza Energetica

Nell'ambito di quest'attività è stato progettato, realizzato e sperimentato *E-QUEM PA* un percorso formativo basato sull'utilizzo delle nuove tecnologie per l'apprendimento e finalizzato a migliorare le competenze da parte dei funzionari pubblici nel campo della gestione dell'energia e dell'efficienza energetica.

E-QUEM (e-Qualification of the Energy Manager) è un corso di formazione, articolato in 10 moduli della durata complessiva di 100 ore, fruibile on line dalla piattaforma tecnologica che presenta il panorama delle conoscenze necessarie per svolgere la professione. Nella presente annualità il corso è stato aggiornato ridefinendone i contenuti rispetto al nuovo target di riferimento (tecnici della Pubblica Amministrazione).

Il test è avvenuto all'interno di due corsi realizzati presso la Scuola delle Energie del Centro ENEA della Casaccia. Questa formazione pilota ha raccolto le valutazioni, i commenti ed i suggerimenti di tutti partecipanti. Nella prossima annualità, a partire dall'analisi dei test pilota, si passerà alla realizzazione della versione finale, alla definizione di un piano di diffusione presso PA.

L'attività è descritta nei dettagli nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/147.

Definizione, validazione e verifica di requisiti di ecodesign e di etichettatura energetica per gli apparecchi domestici, professionali e commerciali, in particolare nel settore refrigerazione, lavaggio, cottura, condizionamento e illuminazione. Definizione e pubblicazione di standard internazionali ed europei per questi prodotti

Per quanto concerne i prodotti per la refrigerazione domestica, nell'ultimo ventennio si è assistito a una vivace evoluzione normativa (catalizzata da quella tecnologica), culminata nel tentativo internazionale del *Technical Committee* 59 della IEC di sviluppare un metodo unico e condiviso per la valutazione delle loro prestazioni, energetiche e non. Si tratta di un passaggio chiave per permettere l'omogeneizzazione (tanto richiesta dai produttori) degli schemi di etichettatura energetica e di controllo dell'immissione sul mercato che nel tempo si sono sviluppati nelle diverse regioni mondiali. Tale sforzo ha portato alla seconda edizione dello standard IEC 62552[27] che nel marzo del 2013 è stato rilasciato per l'iter di consultazione e approvazione.

Nell'annualità sono state eseguite una serie di prove che rappresentano una delle prime applicazioni della nuova procedura IEC, al di fuori del TC59 della IEC. I risultati ottenuti (da un ente terzo) pongono le basi per fornire, presso gli opportuni tavoli di dibattito, una prima valutazione del metodo, il riconoscimento delle principali criticità di applicazione e delle proposte di affinamento e completamento. In particolare, lo studio propone un contributo originale, utile a completare il calcolo, delineato dalla nuova proposta di standard, del consumo energetico annuale di un apparecchio e a permettere un confronto quantitativo con la vigente normativa di riferimento.

Lo studio svolto è illustrato nei dettagli nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/149.

Tool informatico per l'uso efficiente delle apparecchiature elettriche nel residenziale

La spesa per le forniture energetiche pesa sempre più sul bilancio economico delle famiglie, nell'ambito della Ricerca di Sistema è stata sviluppata una prima versione di un tool che mira a dare risposta a queste problematiche, permettendo di quantificare il risparmio economico che sarebbe possibile ottenere a costo zero, modificando le abitudini relative a "quanto" e "quando" si utilizzano le apparecchiature elettriche presenti in una abitazione.

Il lavoro eseguito rappresenta un primo esempio di applicazione di strumenti che possono rappresentare metodologie di indagine e di monitoraggio dei consumi energetici alternative a quelle tradizionali. Lo strumento, sviluppato in Excel, nella sua prima versione è composto da diverse schermate di interfaccia utente, il quale è guidato in ogni passo della procedura - dall'inserimento dei dati di input alla spiegazione dei principali risultati - da appositi suggerimenti/ commenti che accompagnano tabelle e grafici. Gli step sono sostanzialmente tre:

a) audit energetico;
b) analisi degli effetti dell'adozione di comportamenti maggiormente virtuosi (livelli di utilizzo delle apparecchiature);
c) 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 CO_2. Nella sua prima versione, il tool contempla i consumi energetici associati all'utilizzo di apparecchiature elettriche largamente diffuse nelle famiglie, quali elettrodomestici ed apparecchiature per l'intrattenimento e per l'illuminazione.

Il Tool permette in primo luogo di stimare i consumi energetici e la relativa spesa per l'utente, alla luce dei dati sul numero, la classe energetica ed il livello di utilizzo medio delle tecnologie, informazioni preventivamente recepite.

Stimata la bolletta energetica e le utenze che maggiormente influiscono alla sua composizione, vi è una sezione inerente le azioni di risparmio energetico, nelle quali l'utente può "simulare" comportamenti maggiormente virtuosi rispetto al proprio abituale ricorso alle apparecchiature, ed ottenere informazioni circa i benefici economici ed ambientali derivanti dall'adozione di tali modelli di comportamento alternativi.

Infine, nella sezione "uso razionale delle apparecchiature" l'utente può quantificare il risparmio in bolletta associato ad un diverso utilizzo delle tecnologie, in riferimento non solo ad un minor ricorso alle stesse, ma ad un utilizzo più razionale da un punto di vista puramente "economico" alla luce, cioè, delle differenti fasce di prezzo dell'energia.

Il momento applicativo del Tool è stato implementato per mezzo di una rilevazione effettuata su un campione qualitativo di intervistati, selezionati allo scopo di rendere conto di diverse tipologie familiari e di abitazione, nonché di dotazione tecnologica e comportamenti.

[27] prIEC 62552 ed2 (2013), "Household refrigerating appliances - Characteristics and test methods", IEC, Data di diffusione: 2013-05-10.

Il consumo medio annuo pro-capite per usi elettrici stimato da Tool si scosta di appena il 2% rispetto al valore 2013 registrato in Italia; in termini di spesa media annua per tipologia familiare, si riscontra una sostanziale uniformità dei risultati stimati con i dati nazionali Istat. Nel complesso, le alternative di comportamento simulate attraverso il Tool hanno condotto a risparmi medi annui dell'ordine del 30%, con variazioni differenti a seconda della tipologia di famiglia interrogata.

L'insieme di quesiti posti a valle della disseminazione e compilazione del Tool, ha evidenziato:

- un livello di complessità/onerosità sostanzialmente basso nella raccolta dei dati di input;
- un grado di conoscenza dell'intervistato in riferimento alle tematiche affrontate medio basso per oltre la metà del campione;
- una predisposizione "media" al cambiamento delle proprie abitudini a favore di comportamenti maggiormente virtuosi, in primo luogo derivante da una situazione di partenza già ritenuta virtuosa;
- un elevato livello di attendibilità dei risultati del Tool ed un grado di complessità medio, migliorabile con l'utilizzo di interfacce e/o soluzioni informatiche differenti;
- aumento dell'interesse, da parte degli intervistati, verso una maggiore conoscenza delle proprie condizioni contrattuali ed una maggiore consapevolezza circa la necessità di sostituzione delle apparecchiature più obsolete.

Da quanto emerso, le attività future si concentreranno da un lato verso la disseminazione dello strumento ad un campione di numerosità sensibilmente maggiore e dall'altro verso il miglioramento dell'interfaccia dello strumento, più semplice ed immediato. A tale riguardo si stanno prendendo in esame diverse soluzioni e nuove piattaforme di sviluppo del software.

L'attività è descritta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/150.

g. Comunicazione dei risultati

Piano di Comunicazione per l'Efficienza Energetica

Negli ultimi tempi il tema dell'Efficienza Energetica ha oltrepassato i confini delle aree di interesse in cui era originariamente discusso, Ricerca e Sviluppo tecnologico, per diventare tema di riflessione e discussione di nuove aree che originariamente non erano interessate a questo tema. Di efficienza energetica si parla ormai sempre di più in politica, in economia, in finanza, in tematiche socio-comportamentali e il fenomeno è in continua espansione.

Le nuove normative, europee e nazionali, in tema di efficienza energetica, l'espansione dei mercati dell'efficienza energetica, una maggiore sensibilità dei cittadini rispetto a questi temi, sono solo alcuni dei sintomi di questo fenomeno che pone però una problematica forte riguardo al modo in cui si parla di efficienza energetica. Se tutti, o quasi, parlano ormai di efficienza energetica e lo fanno declinandola secondo il proprio linguaggio e le proprie forme di comunicazione, ne consegue che a rischiare di sparire è proprio il messaggio proveniente dalla Ricerca e dallo Sviluppo tecnologico che sono le meno abituate a tradurre le proprie attività e i propri risultati in messaggi comunicativi.

Per questo motivo nell'ambito del presente progetto ENEA ha ritenuto di avviare un'attività di ricerca nell'ambito della comunicazione, in collaborazione con l'Università di Perugia, per mettere a punto un Piano di comunicazione con l'obiettivo di comunicare in modo efficace i temi dell'efficienza energetica e i risultati della ricerca in questo ambito.

Il Piano di comunicazione ha lo scopo di trasformare la mera informazione scientifica in comunicazione scientifica attraverso un'analisi dello scenario in cui si opera, una pianificazione strategica degli obiettivi da raggiungere, dell'individuazione dei target a cui rivolgere il messaggio (cittadini, imprese, PA), la scelta dei mezzi di comunicazione più efficaci per ogni target, la progettazione e successiva realizzazione dei prodotti di comunicazione realizzati secondo i risultati dell'analisi strategica, la misurabilità degli effetti dell'attività di comunicazione.

Il Piano ha portato alla progettazione di diversi prodotti di comunicazione, tra questi si è scelto di sviluppare un prodotto consistente in una piattaforma web concepita per fungere da hub tecnologico-informatico per veicolare le informazioni sfruttando tutte le potenzialità della comunicazione 3.0 e caratterizzato dalla interattività tra l'emittente e i target nel comunicare su questi temi in modo da verificare l'efficacia dell'attività di comunicazione, di individuare ulteriori target o sotto-target e rimodulare il messaggio sulla base dei feedback ricevuti.

L'attività è descritta nel rapporto tecnico RdS/PAR2013/152.

EduchiAmo, InformiAmo, RisparmiAmo. Piano di comunicazione per un'Italia più consapevole e maggiormente rivolta al risparmio energetico e all'efficienza energetica

L'obiettivo della ricerca è quello di giungere a proporre una piattaforma in grado di implementare una comunicazione che dovrà soprattutto stimolare e suggerire, aumentare la cultura del risparmio energetico, divenendo il punto di riferimento in special modo per tutte quelle PA intenzionate a trasformare il risparmio energetico in un valore in grado di caratterizzare il comportamento dei suoi dipendenti.

Il contesto di riferimento è fortemente condizionato dall'incidenza dell'utilizzo del web 3.0: viviamo l'epoca dei prosumer (persone che sono nello stesso tempo produttori e consumatori di informazione), i social network sono uno strumento molto utilizzato per prendere le proprie decisioni e per farsi una opinione. Sempre più spesso le persone scelgono sulla base delle esperienze altrui captate in rete.

Nell'ambito del progetto finalizzato alla comunicazione/educazione su risparmio energetico ed efficienza energetica, si è pensato ad un'azione di base unica per i tre target coinvolti: PA, cittadini e professionisti del settore. Ciò in virtù dell'idea di sviluppare una piattaforma unica, in cui possano convergere tutte le azioni comunicative del progetto. L'obiettivo, pertanto, è creare un "ambiente" in cui le PA fra di loro, le PA con i cittadini, i cittadini con le PA, e i professionisti del settore sia con le PA che con i cittadini possono: 1) comunicare: scambiarsi informazioni su tutto ciò che riguarda il risparmio energetico; 2) entrare in conflitto: dare la possibilità ad un attore di evidenziare le inefficienze degli altri attori; 3) cooperare per attivare dei progetti finalizzati a promuovere il risparmio energetico.

Provando ad immaginare ciò che si potrebbe verificare, la proposta di piattaforma mira a fare in modo, ad esempio, che i cittadini e i professionisti del settore possano premiare o punire le P.A. più o meno virtuose dal punto di vista del risparmio e dell'efficienza energetica, attraverso segnalazioni anonime e previa iscrizione - con tracciamento dell'IP del computer - e con l'immediata evidenza del risultato sul web.

Entrando più nel dettaglio, cittadini, PA e professionisti potranno usare la piattaforma con diversi scopi e funzioni.

I cittadini:

- Fanno segnalazioni
- Scaricano materiale informativo
- Scaricano widget per i propri blog e portali
- Inseriscono recensioni sul virtuosismo o meno delle P.A. con le quali sono entrati in contatto

Le Pubbliche Amministrazioni:

- Aderiscono alla gara/concorso annuale per l'amministrazione più efficiente e risparmiosa
- Vengono informate periodicamente attraverso una mail e report periodici sui risultati e le segnalazioni dei cittadini
- Hanno a disposizione QR Code da inserire sulla carta intestata, all'ingresso degli uffici, sugli organi di informazione periodica del Comune
- Hanno a disposizione widget da inserire nel loro sito Internet ufficiale
- Possono scaricare materiale informativo "easy to use" da scaricare e divulgare attraverso i propri sistemi informativi

I professionisti:

- Verificano quali sono le PA.più virtuose
- Cercano di individuare quelle che invece hanno bisogno di intervento, proponendosi con soluzioni e innovazioni tendenti al risparmio e all'efficienza energetica
- Ricevono informazioni su possibili interventi da fare (particolare beneficio per il mercato del lavoro nel settore energia).

La piattaforma dovrà infine divenire il "luogo ideale" per il lancio di tutte le campagne di comunicazione riguardanti il risparmio energetico e contenere contenuti quali recensioni di pubblicazioni, promozione di bandi/concorsi e progetti europei, rassegna stampa, e link utili. Accanto al portale verranno realizzate: 1) Pagina Facebook dedicata, 2) Profilo Twitter dedicato; 3) Ufficio stampa e relazioni con il territorio online.

Dettagli sull'attività, condotta dall'Università di Perugia, sono contenuti nel rapporto RdS/PAR2013/PAR153.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energetica *(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. Le attività sono state sviluppate con un coinvolgimento del personale ENEA, per la definizione dei parametri e di nuovi indicatori non previsti dalla metodologia comparativa definiti dalla Commissione UE

Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC) *(rif. Obiettivi 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:

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) (Proposal for adaptive shading devices for adaptive environment).

Obiettivo e: lo sviluppo di un protocollo per lo sporcamento 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.
Le attività sono state sviluppate con un coinvolgimento di personale ENEA relativamente alla definizione delle procedure da utilizzare per le analisi dei dati di consumo (Obiettivo a); alla definizione dei sistemi di controllo della radiazione solare incidente (Obiettivo b); allo sviluppo del protocollo per lo sporcamento e l'invecchiamento accelerati (Obiettivo e).

Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica *(rif. Obiettivo a e b)*

Le attività hanno riguardato tre distinti temi: la definizione dei parametri energetici da utilizzare per la metodologia comparativa, prevista dalla Direttiva 32/20107CE, 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 per lo studio dei consumi energetici e l'influenza del comportamento degli occupanti sui consumi stessi, con modelli predittivi diretti e 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 alla scala di territorio e di grande patrimonio edilizio.

Università "Sapienza" di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) *(rif. Obiettivo a)*

Le attività di ricerca hanno riguardato: un'indagine sui consumi e sugli interventi di risparmio energetico degli impianti natatori gestiti dal CONI Servizi e l'analisi di alcune piscine private. E' stata condotta un'indagine statistica, su circa 200 impianti sparsi sull'intero territorio nazionale, per comprendere quali siano le più logiche suddivisioni dei diversi centri sportivi in funzione delle diverse variabili principali come, ad esempio, il tipo di sport, l'eterogeneità degli sport praticati all'interno nel caso di impianti polisportivi, la zona climatica, la superficie occupata, la tipologia di macchine da conversione istallate, il livello di ottimizzazione, etc..
Nell'ambito del lavoro si sono rilevati come pesi, in termini energetici, la qualità della gestione e la capacità di intervento organizzativo e tecnico dei gestori. Da tali indagini si è arrivati a definire quali siano i principali interventi di risparmio energetico che portano margini significativi di ottimizzazione. Di fatto vengono definiti ed

indicati gli interventi edili, impiantistici e di processo con i relativi margini di risparmio prevedibili per la valutazione dei consumi.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Energetica *(rif. Obiettivo a)*

L' attività è stata finalizzata alla determinazione dei fabbisogni di caldo e freddo per gli edifici suscettibili ad essere classificati come NZEB a livello nazionale in diverse aree climatiche ed a definire strategie e tecniche di accumulo. Per quello che riguarda il primo punto, si è tenuto presente che nella legislazione in fase di sviluppo (attuativo della Legge 90/13) gli edifici NZEB sono caratterizzati da consumi di energia primaria totale (rinnovabile e non rinnovabile) corrispondenti a quelli dell'edificio di riferimento caratterizzato dai valori limite di legge previsti al 2020 e da una copertura di energie rinnovabili di almeno il 50%. E' stata definita una abitazione monofamiliare e studiato l'andamento dei fabbisogni termici nel clima di Milano, lo stesso edificio, in termini di geometria, è stato poi studiato anche con il clima di Palermo . Le attività sono state sviluppate con un coinvolgimento di personale ENEA.

Università di Pisa, Dipartimento Energetica *(rif. Obiettivo a)*

Le attività eseguite dall'Università di Pisa sono state finalizzate a sviluppare un software per l'audit energetico negli edifici del civile, residenziale e non residenziale. Il software ha tenuto conto della metodologia sviluppata nella precedente annualità e 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 sviluppare uno strumento "semplice" da utilizzare per gli aspetti che investono le raccomandazioni della certificazione energetica degli edifici e per quanto viene richiesto dal DLgs 115/09. Questostrumento potrà essere utilizzato, per interventi di audit energetico per la riqualificazione del patrimonio edilizio pubblico.

Università di Bari, Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali *(rif. Obiettivo d)*

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 Palermo, Dipartimento dell'Energia *(rif. Obiettivo b)*

Le attività sono state finalizzate a identificare un ristretto campione di edifici scolastici rappresentativo del patrimonio edilizio siciliano. Il campione è stato indirizzato su tre edifici adibiti a strutture scolastiche relative a differenti gradi di istruzione: una scuola elementare, una media ed una superiore. In particolare, l'edificio che ospita la scuola elementare ha subito negli ultimi anni estesi interventi di ristrutturazione e riqualificazione che hanno permesso un'analisi comparata degli effetti delle nuove normative (ad esempio, in materia di rendimento energetico in edilizia, il DPR n.59/2009) sulle prestazioni energetiche del caso studio.
Gli edifici analizzati sono rappresentativi della eterogeneità del patrimonio edilizio siciliano poiché si tratta di:

- edifici differenti posti nelle zone climatiche B e C, che caratterizzano più del 65% dei Comuni siciliani,
- edifici dalle caratteristiche termofisiche differenti: tipiche costruzioni degli anni '70 ($U_{superfici_verticali}$>1 W/(m^2K)) ed edifici recentemente ristrutturati (U conforme al DPR n. 59/2009), edifici che ospitano scuole di differente ordine e grado.

Il Dipartimento dell'Energia 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.

Università Sapienza di Roma, Centro Ricerche CITERA *(rif. Obiettivo b)*

Le attività, in considerazione da quanto fatto nel primo anno, sono state finalizzate alla predisposizione degli elaborati del progetto esecutivo di riqualificazione energetica, corredato da una serie di studi ed analisi dei materiali e delle soluzioni, da un computo metrico e dalla predisposizione di un capitolato d'appalto da condividere con gli uffici legali della Provincia di Roma. Con la Provincia di Roma sono in via dii definizione le modalità per l'utilizzo di un contratto di garanzia di prestazione energetica EPC e quelle per l'espletamento della gara d'appalto. Le attività sono state sviluppate con un coinvolgimento di personale ENEA

Università di Perugia, Dipartimento di Scienze Politiche *(rif. obiettivo f e g)*

Il principale obiettivo è stato quello di promuovere la cultura e le buone prassi legate al risparmio energetico. E' stato realizzato di un piano di comunicazione rivolto ai dipendenti delle pubbliche amministrazioni, ai professionisti del settore e di conseguenza ai cittadini, al fine di sensibilizzare all'utilizzo di energie rinnovabili e di informare sulle varie possibilità e tecnologie che permettano di diminuire l'utilizzo di energia derivante da fonti fossili.
Sensibilizzare questi target è il primo passo che parte dal presupposto che prima di tutto si debbano coinvolgere i cittadini e che in ogni comportamento e in ogni contesto le nostre scelte devono essere guidate da criteri di efficienza, efficacia ed economicità.

Altri soggetti

Centro Ricerche CRESME *(rif. Obiettivo b)*

Il CRESME ha svolto attività di ricerca ed indagine per la definizione del parco immobiliare del settore ospedaliero e dei relativi consumi energetici. Il lavoro ha portato a definire la consistenza degli edifici di queste destinazioni d'uso, ne ha caratterizzato la distribuzione sul territorio e le caratteristiche tipologiche costruttive ed impiantistiche, i consumi energetici da bolletta. In parallelo la stessa tipologia di attività è stata condotta su edifici pubblici destinati a scuole ed uffici. 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 effettuato una ricerca finalizzata allo sviluppo di un modello per promuovere il teleriscaldamento nell'ambito dell'amministrazione pubblica. Sono state condotte indagini, presso gli Energy Manager e le PA, e analisi sulla diffusione di questa tecnologia con riferimento ad impianti di piccola e media taglia e sono state redatte delle linee guida per l'adozione di tale soluzione nella PA tenendo conto delle condizioni e delle regole di mercato. Tale attività deriva dal fatto che il teleriscaldamento è una delle soluzioni promosse in modo deciso dalla direttiva 2012/27/UE, che contestualmente chiede alla Pubblica Amministrazione di giocare un ruolo centrale nell'efficienza energetica, non solo promuovendo adeguato strumenti di regolazione e pianificazione, ma soprattutto realizzando interventi di riqualificazione energetica del parco edifici.

Comitato Termotecnico Italiano CTI *(rif. Obiettivo a)*

Il CTI ha svolto una ricerca per la riqualificazione degli edifici della PA con un particolare interesse per l'edificio "NEZB" e per interventi ad alta efficienza con prestazioni ottimali, ovvero quelle prestazioni caratterizzate dai costi totali minimi (investimento e installazione, più manutenzione e gestione). La ricerca ha prodotto la definizione degli edifici di riferimento per le analisi, in cui sono state definite le caratteristiche termo-fisiche generali relative agli edifici pubblici di riferimento utilizzati per l'analisi; la definizione degli interventi che rientrano nel concetto di "efficienza energetica", in cui sono stati quindi esaminati materiali, tecniche, tipologie costruttive ed impiantistiche, impianti per la gestione integrata degli edifici (*Building automation*) ed il controllo automatico e razionalizzato delle funzioni dei sistemi di climatizzazione, controllo dell'umidità, riscaldamento, illuminazione, sistemi di sicurezza, di rivelazione gas, di controllo, di misura dell'energia e di controllo dei carichi elettrici. E' stata creata una banca dati di innovazioni rese disponibili dall'industria nazionale che include i principali risultati di una ricerca relativa alle maggiori innovazioni attualmente presenti sul mercato. Ed è stato messo a punto un algoritmo per la stima dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica e dei livelli di incentivi necessari per rendere convenienti le singole innovazioni; predisposizione di indici che mettono in luce il rapporto costo/benefici dei diversi interventi. Questa fase ha affrontato in forma semplificata la tematica della ristrutturazione energetica ipotizzando che questa avvenga contestualmente ad opere di manutenzioni

straordinarie (finestra di opportunità), e dunque di adeguamento del fabbricato, con lo scopo di migliorare la funzionalità, la sicurezza e il decoro dell'edificio. Individuati e quantificati tutti i costi e i benefici di una data opzione, viene definita, sulla base di queste informazioni, l'opportunità di un dato investimento (efficacia).

ZENITAL *(rif. Obiettivo b)*

ZENITAL, Associazione Nazionale di Produttori di Sistemi di Illuminazione Zenitale ed Evacuatori di Fumo e Calore, è il maggior referente istituzionale del settore in Italia ed ha acquisito il riconoscimento a livello internazionale. Zenital ha indirizzato le proprie attività puntando sulla qualifica dei prodotti, anticipando l'orientamento del settore delle costruzioni, che è ad un svolta derivante dall'applicazione delle direttive europee ecepite o in fase di recepimento da parte degli Stati membri.
In questo ambito per rispondere alla direttiva ECODESIGN l'ENEA in collaborazione con l'Associazione si sta impegnando per definire una metodologia di etichettatura energetica dei prodotti con particolare riferimento a cupolini e lucernai per rispondere a quanto sarà richiesto dal mercato ed dal DLgs 104/2012 di recepimento della Direttiva 2010/30/UE.

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 metano, 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.

L'obiettivo del progetto 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 ad 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 ed 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, il progetto si indirizza verso l'approfondimento di quelle attività teoricamente in grado di ridurre al minimo il contributo delle fonti energetiche tradizionali per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti 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 Green Guide (2006) si possono indicare le seguente 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 di questo 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.

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 ed 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 CO_2 fino al 60% rispetto ai sistemi tradizionali basati sull'uso di combustibili fossili. Le pompe di calore utilizzano direttamente l'energia fornita dal sole ed 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 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- il 35 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- il 50 per cento quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Gli unici generatori in grado di rispettare i dettami del D.Lgs 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 performanti le diverse tecnologie emergenti 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 sulla climatizzazione innovativa 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 CO_2, 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 tele-diagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Le attività di ricerca sono state suddivise in quattro differenti macro obiettivi:

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi
b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura
c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione
d. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati.

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 Sistemi di accumulo a cambiamento di fase PCM abbinati a impianti di solar heating and cooling

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente, che ha curato l'analisi teorica delle modalità di scambio termico tra acqua e PCM, effettuando lo studio parametrico delle principali variabili in gioco (spessori, proprietà fisiche dei materiali, velocità di efflusso, ecc.).

ENEA si è occupata dei test sperimentali dei nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare prestazioni più elevate in termini velocità di risposta del PCM alla variazione di temperatura del fluido primario all'interno del quale sono immersi. Al fine di valutare le prestazioni di molteplici materiali ed i differenti metodi di incremento della loro conducibilità, ENEA ha sviluppato e messo a punto un modello fluidodinamico in ambiente FLUENT per l'analisi del comportamento di tali materiali.

Questa attività di ricerca su un innovativo sistema di accumulo termico trova giustificazione in quanto l'energia ottenuta con i pannelli solari termici può superare la richiesta in alcune parti del giorno, mentre può risultare insufficiente in altre ore della giornata. Questo porta ad avere fluido primario che nelle fasi di irraggiamento raggiunge temperature molto alte e spesso si ha la necessità di smaltire il calore in eccesso, che invece sarebbe utile nelle fasi di scarsa produzione.

La possibilità di accumulo dell'energia termica in eccesso può aumentare quindi notevolmente il rendimento medio di un impianto solare termico, per cui lo sforzo per aumentare la capacità di accumulo sta crescendo di pari passo con la diffusione dei pannelli solari.

Il metodo classico è quello dell'utilizzo di un serbatoio di accumulo, in cui l'energia immagazzinata dipende dalla variazione di temperatura e dalla capacità termica totale, funzione del calore specifico c_p e della massa M del fluido $E=M\ c_p\ \Delta T$. Quindi l'energia in eccesso potrà essere accumulata solo nella quantità permessa dalla temperatura massima del fluido rispetto a quella richiesta dalle utenze.

Un metodo più efficiente può essere quello di sfruttare il calore latente di fusione λ, che permette, a parità di massa, di accumulare quantità molto maggiori di energia con temperatura pressoché costante (pari alla temperatura di fusione). L'energia accumulata durante il passaggio di fase è E=M λ. I materiali utilizzabili a tale scopo sono definiti PCM e negli ultimi anni sono stati proposti e sperimentati per varie applicazioni che spaziano dalle batterie elettriche agli intonaci per edilizia o alle pareti di furgoni-frigorifero.

Per fornire una valutazione indicativa del vantaggio ottenuto sostituendo parte dell'acqua del serbatoio di accumulo con PCM, si è confrontato il calore latente di fusione di alcuni di questi materiali con l'energia assorbita dalla stessa massa di acqua per un ΔT=10°C.

Considerando le caratteristiche riportate in Tabella 115 si può facilmente calcolare che ad esempio il calore assorbito dalla fusione di un kg di A46 (λ=155 kJ) equivale al riscaldamento di 10 °C di 7,4 kg di acqua. Nell'ultima riga della tabella, nella colonna λ è mostrata l'energia assorbita dall'acqua per un ΔT=10°C.

Tabella 115. Caratteristiche dei PCM esaminati

Materiale	Tipo	T_{pc} [°C]	Densità ρ [kg/m^3]	Calore latente di fusione λ [kJ/kg]	VHC [MJ/m^3]	Calore specifico c_p [kJ/kg K]	Conducibilità termica k [W/m K]	T_{max} [°C]	Pericolo
S46	Sale idrato	46	1587	**210**	333	2,41	**0,450**	56	irritante
S44	Sale idrato	44	1584	**100**	158	1,61	**0,430**	120	irritante
A48	Organico	48	810	**234**	190	2,85	**0,180**	300	irritante
A46	Organico	46	910	**155**	141	2,22	**0,220**	300	-
A43	Organico	43	780	**165**	129	2,37	**0,180**	300	tossico
X40	Solido-Solido	40	1046	**125**	131	1,67	**0,360**		dannoso
acqua	risc, 10°C		1000	**41,8**	41,8	4,18	**0,603**	100	

dove T_{pc} = T di cambiamento di fase; VHC = Capacità termica volumetrica

Purtroppo però l'utilizzo reale di tali materiali si scontra con la limitazione dovuta alla bassa conducibilità, Questo, infatti, provoca una fusione molto lenta della massa di PCM, e quindi un accumulo reale più piccolo se i tempi caratteristici delle variazioni di temperatura del fluido primario sono molto minori del tempo di fusione. Questo è stato visto sperimentalmente con una serie di prove effettuate su uno dei tubi di PCM installati nel serbatoio di accumulo, e attraverso la simulazione con il codice FLUENT è stato valutato il valore di conducibilità necessario per una risposta sufficientemente rapida.

Sono stati allora valutati sistemi per aumentare la conducibilità termica e sono state eseguite sia prove sperimentali che simulazioni del comportamento dei PCM in tali condizioni.

I metodi proposti in letteratura per tale scopo sono normalmente quelli di aumentare la superficie di scambio o di favorire il trasporto di calore all'interno del PCM. Il primo metodo si ottiene ad esempio incapsulando il PCM in piccole sfere ottenendo così un elevato rapporto superficie/volume, ma con ovvi problemi meccanici in caso di dispersione di tali particelle in liquidi in movimento. Un metodo più promettente può essere quello di disperdere nanoparticelle molto conduttive nel PCM, in quanto questo dovrebbe dare problemi meccanici minori, ma i miglioramenti ottenuti non sembrano entusiasmanti.

Il secondo metodo consiste nell'usare di alette o schiume solide ad alta conducibilità, in cui inserire il PCM, per fornire passaggi preferenziali al calore verso le zone interne della massa di PCM, ottenendo un effetto equivalente all'aumento della conducibilità media del sistema.

Nel presente lavoro si è dapprima esaminato il comportamento sperimentale delle candele contenenti PCM S46 (Tabella 115), utilizzate nel serbatoio da 1000 L installato presso l'impianto di "solar heating and cooling a servizio dell'Edificio F-92" in ENEA-Casaccia. Tale studio è stato effettuato utilizzando l'impianto sperimentale HETNA (già esistente) per fornire ad una singola candela (L=1 m, D=0,05 m) una condizione tipica e valutarne la risposta, Tali risultati sono stati poi confrontati con la simulazione FLUENT e, verificato il buon accordo, sono state simulate le risposte ottenute variando la conducibilità del PCM.

Si è proceduto quindi con la misura sperimentale dell'incremento di conducibilità ottenuto inserendo il PCM (paraffina A46) in una schiuma solida ad alta conducibilità (SiC). La prima misura è stata effettuata tramite un misuratore di conducibilità termica di tipo "transient plane source technique". Considerando però l'incertezza dovuta alla non uniformità del materiale, che rende poco affidabile la misura locale con lo strumento utilizzato, si è proceduto alla misura sperimentale del transitorio con provini di PCM o PCM+schiuma, usando un dispositivo di prova appositamente realizzato. Anche questo provino è stato simulato con il codice Fluent e la schematizzazione ottenuta, dopo il confronto con i dati sperimentali, è stata poi utilizzata per valutare le prestazioni di schiume di altri materiali o con altri PCM.

Sperimentazione con l'impianto HETNA-PCM

L'impianto sperimentale è stato realizzato sfruttando parte dell'impianto HETNA (Hydraulic Experiments on Thermo-mechanical of Nanofluids) utilizzato per lo studio dei nanofluidi. In Figura 425 è mostrato lo schema del circuito eun immagine dell'impianto, con in primo piano il preriscaldatore, sulla sinistra il misuratore di portata e la pompa, e sulla destra il vessel (il tubo verticale coibentato) contenente la candela del PCM. L'impianto è stato utilizzato per effettuare la misura della temperatura dell'acqua in uscita, dopo aver percorso il canale in contatto con il contenitore di PCM, quando la temperatura in ingresso subiva un aumento paragonabile a quello che si verifica nel primario dell'impianto reale.

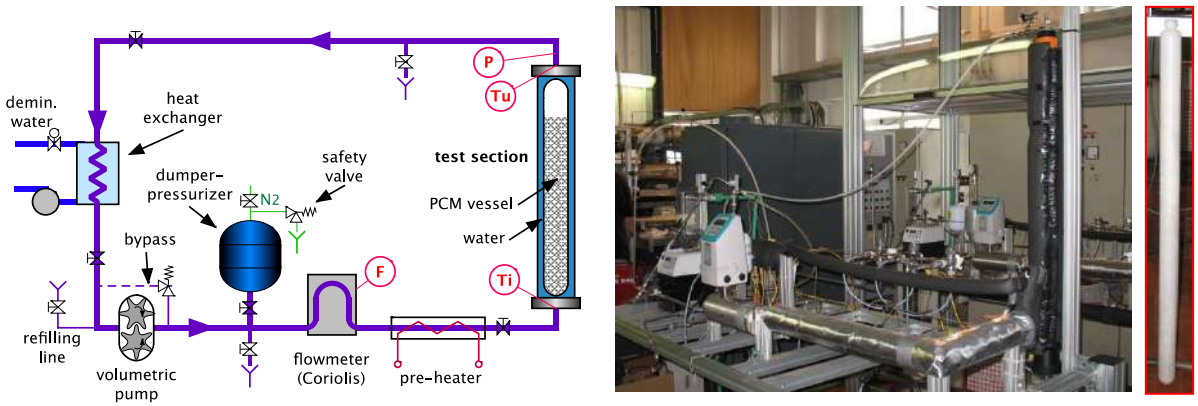


Figura 425. Schema del circuito e foto dell'Impianto HETNA-PCM con a destra un tubo contenente il PCM S46

Le condizioni delle prove sperimentali su un singolo tubo con l'impianto descritto sono le seguenti:

- Temperatura di ingresso: da 20 a 85 °C
- Velocità dell'acqua nell'anulo: da 0,2 cm/s a 0,35 cm/s
- Pressione: da 0,1 a 0,13 MPa
- Gradiente di temperatura in ingresso: da 5 a 600 °C/h.

La geometria è equivalente a quella del sottocanale relativo ad un tubo di PCM del serbatoio di accumulo dell'energia termica, con una zona anulare di spessore 5 mm in cui scorre l'acqua, che entra dal basso ed esce dall'alto.

Le prime prove effettuate sono caratterizzate da un rapido incremento della temperatura (600 °C/h); un esempio dei risultati della rampa di temperatura in salita e in discesa sono riportati in Figura 426, dove sono mostrate la temperatura in uscita e la potenza scambiata in corrispondenza al transitorio di temperatura in ingresso. Non si notano effetti visibili sul gradiente di temperatura in uscita intorno ai 46°C (temperatura di fusione). Questo a conferma che l'energia di fusione è assorbita e rilasciata in ore e il suo contributo non può essere distinto da quello derivante dalla capacità termica del materiale monofase.

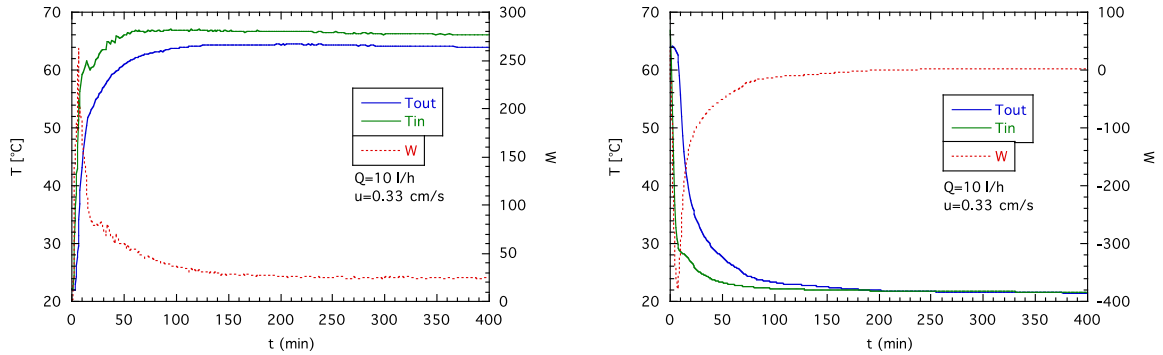


Figura 426. Rampa di temperatura veloce in salita e in discesa

Lo stesso risultato si ha anche nel caso di una variazione di temperatura molto più lenta (in salita 15°C/h, in discesa 5°C/h). Anche in questo caso l'energia di fusione viene assorbita e rilasciata in tempi troppo lunghi.

Sono state eseguite anche delle prove riempendo il tubo d'acqua per mettere a confronto il caso del serbatoio d'accumulo tradizionale con quello contenente PCM. Il confronto diretto dei risultati (Figura 427) mostra che nel caso si utilizzi il PCM l'aumento della T_{in} causa un aumento più rapido della T_{out} nei primi 30 min, ma dopo questo tempo il valore della T_{out} si mantiene più basso di quello della sola acqua, dato che il contributo della fusione continua mentre l'acqua si è ormai scaldata. La stessa cosa si verifica con un'improvvisa diminuzione della T_{in}: senza il PCM la T_{out} rimane più alta nella prima fase del transitorio, ma poi scende rapidamente ad un valore molto vicino alla T_{in}, mentre col PCM il calore latente di fusione la mantiene ad una temperatura leggermente superiore.

Per avere una risposta più rapida è quindi necessario aumentare la conducibilità dei materiali a cambiamento di fase, che come risulta evidente dalla Tabella 115 hanno un k notevolmente basso.

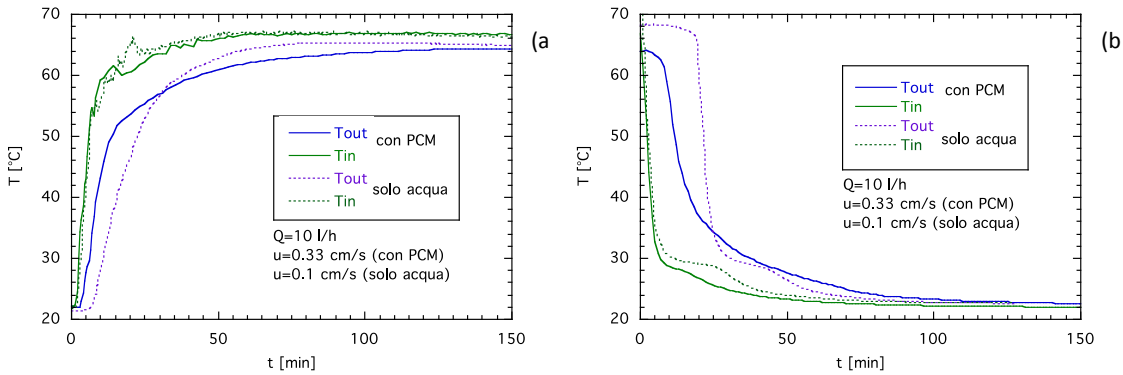


Figura 427. Confronto tra il comportamento con PCM e con solo acqua, in una rampa veloce: a) salita; b) discesa

Simulazioni con FLUENT – Confronto con i dati sperimentali

E' stata eseguita la simulazione del vessel sperimentale usando il codice fluidodinamico FLUENT, in geometria cilindrica. Il primo caso simulato è quello con le stesse condizioni della prova di Figura 426, con cui sono stati confrontati i risultati, al fine di validare il modello ed avere informazioni aggiuntive su parametri non monitorati nel caso reale. In Figura 428 sono mostrati i risultati. Si osserva che la simulazione è abbastanza soddisfacente, soprattutto per i primi 25 minuti di salita della Ti, ma dopo questa fase la Tu_cal prevista dal FLUENT inizia ad appiattirsi per l'effetto della fusione del PCM, mentre questo è molto meno evidente nel caso reale, dove l'effetto

del PCM sembra più lento. Questo sembra indicare che la conducibilità e la capacità termica del sale nei tubi reali probabilmente risente di vuoti derivanti dalla granulosità iniziale.

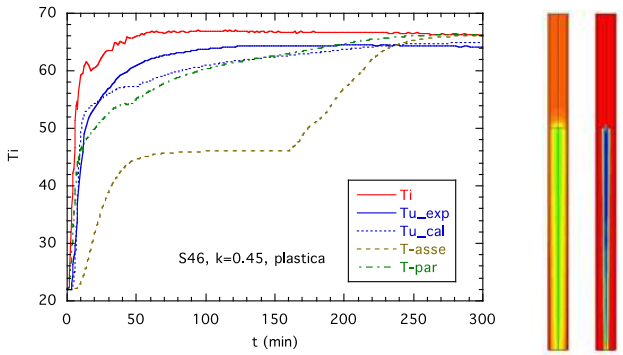


Figura 428. Confronto della T_u sperimentale con la simulazione, e a destra le mappe di temperatura e di frazione di liquido dopo 150 minuti

L'analisi mostra che l'acqua nell'anulo viene raffreddata sempre meno all'aumentare dello spessore di liquido fuso intorno al nocciolo di PCM solido, questo a causa della bassa conducibilità del materiale ma anche per la presenza dei 3 mm di parete di plastica.

Sono stati confrontati anche i transitori nella fase di discesa della temperatura, ottenendo risultati simili a quelli descritti in precedenza.

Dall'analisi effettuata si possono trarre le seguenti conclusioni:

- la simulazione è abbastanza fedele al processo fisico reale, con le discrepanze che si possono imputare ad imprecisioni dei dati derivanti dalle condizioni sperimentali non perfettamente misurabili, come la non perfetta compattazione del sale che inizialmente è granulare, o la degradazione dovuta al basso limite operativo della temperatura;
- l'analisi dei parametri forniti dal modello indicano che, rispetto alle esigenze di accumulo termico nel serbatoio dell'impianto di solar heating & cooling, tutti i PCM valutati hanno una risposta troppo lenta, che fornisce vantaggi solo nelle fasi in cui la temperatura varia a cavallo del valore di fusione e poi si mantiene nel nuovo valore per ore;
- Per rendere il PCM conveniente anche nelle variazioni più brevi, bisogna aumentarne la conducibilità ottenendo così una risposta più rapida.

Simulazioni con FLUENT – Analisi di sensibilità con materiali diversi

Per valutare quali sono i parametri più importanti nell'aumento della rapidità di risposta del PCM, si sono effettuate simulazioni variando la conducibilità (ed il tipo) del PCM, il materiale della parete della candela di PCM, il salto di temperatura intorno alla T_{pc}. Alcuni risultati sono riportati in Figura 429 e mostrano l'effetto non trascurabile della conducibilità sia del PCM che della parete.

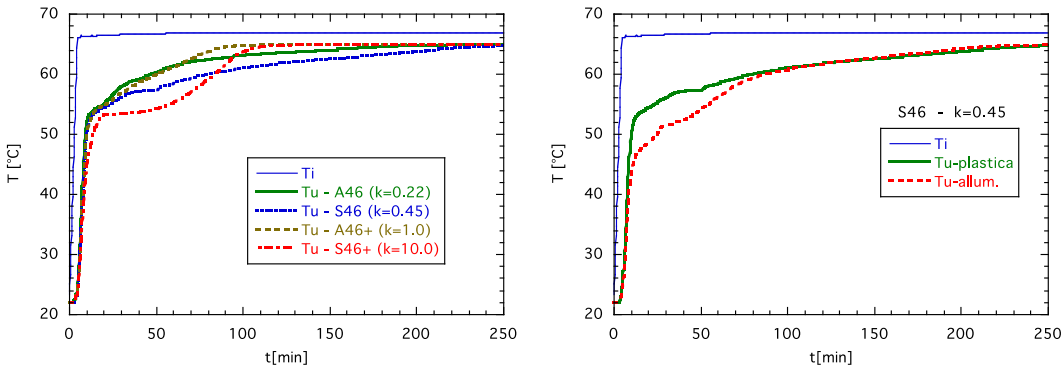


Figura 429. Confronto delle temperature PCM simulati con diversa conducibilità, e con parete di plastica o alluminio, nel transitorio con salita di temperatura

Sperimentazione con l'impianto PCM-mini

L'impianto è finalizzato alla misura dei transitori di temperatura che si verificano in un volumetto di PCM quando una faccia è sottoposta a un flusso o a una temperatura imposta. Il dispositivo consiste in un blocchetto di rame di dimensioni 45x45 mm^2 ed altezza 10 mm, alla cui base si trova un riscaldatore. Sulla faccia superiore viene appoggiato il provino contenente il PCM da testare e con il riscaldatore è alimentato opportunamente per ottenere le condizioni volute (che si mantengono uniformi sulla superficie superiore grazie alla massa di rame). Il monitoraggio è effettuato registrando le termocoppie inserite nel rame e nel provino, insieme alla tensione e corrente dell'alimentatore ed alla potenza calcolata da queste. Le dimensioni del blocco rame sono 45x45 mm^2, altezza 10 mm, quelle del blocco di PCM 40x40 mm^2, altezza 25 mm.

In Figura 430 è mostrato lo schema del dispositivo, con l'indicazione della posizione delle termocoppie e delle tensioni acquisite nel partitore e nello shunt, ed il dispositivo in funzione, con un provino installato.



Figura 430. Schema e foto del dispositivo "PCM-mini per i test su volumetti di PCM

Il PCM S46 utilizzato nelle prove precedenti, essendo un sale idrato ha grossi limiti di utilizzo: non può essere maneggiato in quanto irritante e può degradarsi facilmente, sia se si supera una temperatura massima molto limitata (56 °C), sia se si espone all'aria (in quanto si disidrata).

Per la sperimentazione si è utilizzato il PCM A46, che ha caratteristiche termiche inferiori, ma essendo una paraffina è molto più versatile (Tabella 115). Oltre al blocchetto di PCM puro, sono state eseguite prove anche con lo stesso materiale inglobato in una matrice solida di carburo di silicio (SiC) per valutarne l'aumento di conducibilità termica globale e l'effetto reale sull'assorbimento di energia dopo un aumento di temperatura di una faccia. Il provino di schiuma di SiC ha le seguenti caratteristiche: sezione 40 X 40 mm^2; altezza 25,5 mm; peso 14,7 g; grado di vuoto di 88,9%.

Il PCM all'interno del contenitore viene poggiato sulla lastrina di rame e, alimentando la resistenza, viene riscaldato in maniera uniforme attraverso la superficie di contatto. In Figura 431 è mostrato il blocchetto di SiC vuoto ed uno dei provini usati dopo il riempimento con la paraffina A46.

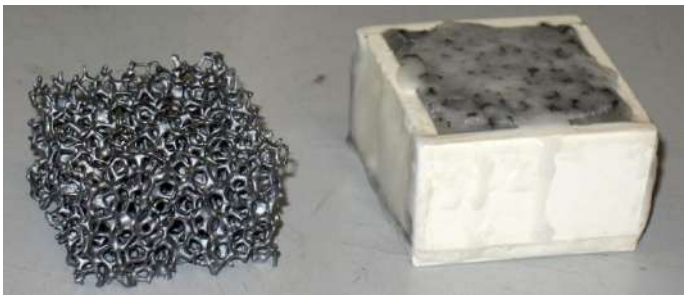


Figura 431. Blocchetto di schiuma di SiC e provino di schiuma riempita con la paraffina A46

Sono state effettuate prove con diverse potenze sia sul blocco di paraffina che sul blocco di paraffina+SiC. In Figura 432 è mostrata la temperatura dell'interfaccia tra rame e PCM in due prove. La temperatura con solo PCM aumenta nel tempo senza risentire troppo del punto d'inizio fusione, mentre con il SiC già da 35 °C si ha un piccolo cambiamento di pendenza che aumenta avvicinandosi al punto di fusione ed intorno a 55°C si ha un evidente appiattimento della temperatura.

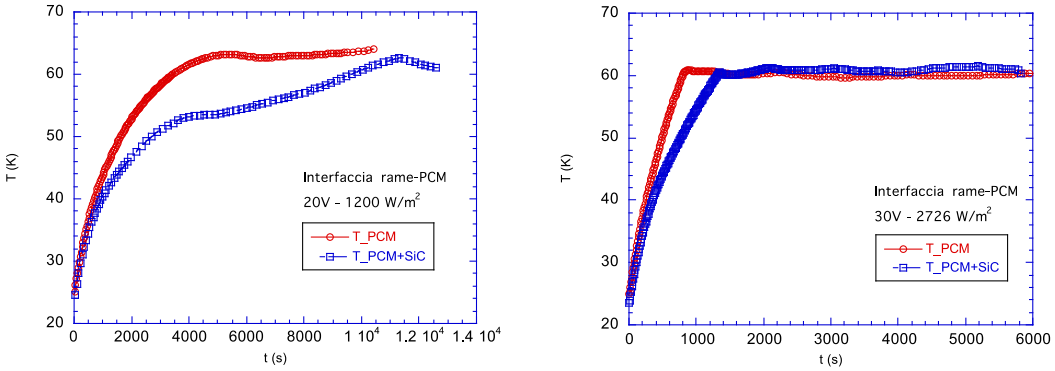


Figura 432. Temperatura all'interfaccia, confronto del caso solo PCM e PCM+SiC per flusso 1200 W/m^2 e 2726 W/m^2

Per confrontare le prestazioni del PCM con quelle del serbatoio con sola acqua, si è calcolata la potenza che sarebbe assorbita da un volume equivalente di acqua (con miscelazione continua) a parità di potenza fornita al sistema. Il risultato è mostrato in Figura 433.

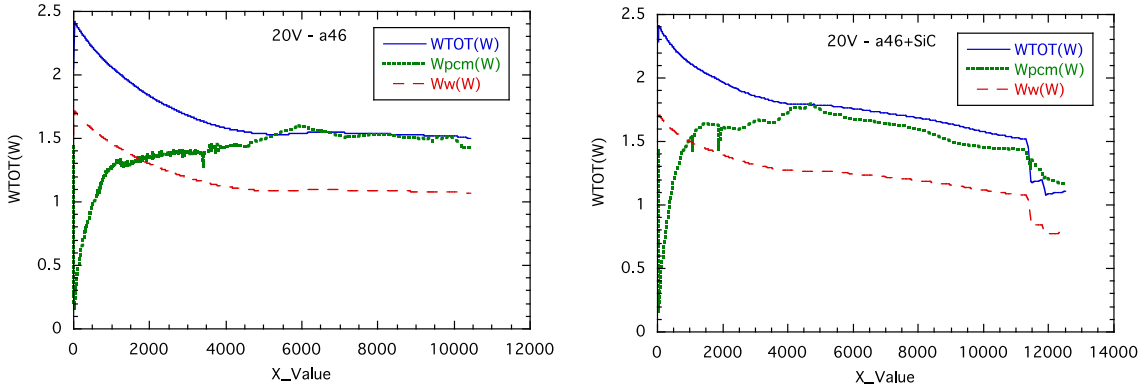


Figura 433. Potenze scambiate nel caso solo PCM e in quello con PCM+SiC. Prova con flusso 1200 W/m^2

Dai grafici si vede che il PCM inizialmente assorbe meno potenza rispetto all'acqua, in quanto nel primo caso la potenza genera soprattutto l'aumento di temperatura del rame (lo strato di PCM riscaldato cresce molto lentamente), mentre nel secondo riscalda anche tutta l'acqua. Intorno ai 1700 s la potenza fornita al PCM supera quella che andrebbe all'acqua, tendendo alla potenza totale poiché il rame non aumenta più di temperatura (siamo nella fase con la temperatura mantenuta costante a 60 °C regolando il flusso termico alla lastrina). Nel caso dell'acqua fornendo la stessa potenza sia il rame che l'acqua continuerebbero ad aumentare la loro temperatura. Con la presenza del SiC il comportamento è qualitativamente simile, ma dal punto di vista quantitativo ci sono importanti differenze, infatti la potenza assorbita dal PCM aumenta più rapidamente e supera quella dell'acqua già prima dei 1000 s.

Simulazioni con FLUENT del PCM-mini: analisi di sensibilità con materiali diversi

Anche per queste prove sono state realizzate delle simulazioni con il codice FLUENT. Le prove sperimentali sull'impianto mini-PCM realizzate inserendo il materiale a cambiamento di fase all'interno di una schiuma di SiC, sono state simulate con lo stesso modello cambiando le proprietà fisiche del PCM.

Nel grafico di Figura 434 due prove sperimentali (solo PCM e PCM + schiuma di SiC) vengono messe in relazione con le rispettive simulazioni. Si riporta in particolare un confronto tra la temperatura all'interfaccia (T_s-C), ossia la temperatura misurata sulla lastrina di rame a contatto con il blocco di materiale a cambiamento di fase. E' possibile notare che c'è una quasi perfetta coincidenza tra le due curve. Il primo grafico dimostra la buona risposta della simulazione, il secondo che la conducibilità del materiale composito è passato a circa k=1 W/mK dal valore 0,22 del PCM puro.

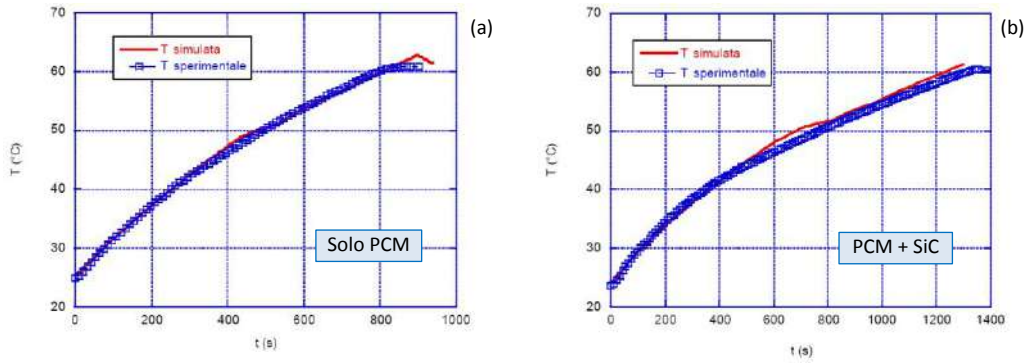


Figura 434. a) Confronto della prova sperimentale con PCM e quella simulata con k=0,22 W/mK; b) confronto della prova sperimentale con PCM+SiC e quella simulata con k=1,0 W/mK

Il modello è stato poi utilizzato per confrontare diversi materiali a cambiamento di fase, simulandone il comportamento nelle medesime condizioni. I risultati sono illustrati in Figura 435. Dal punto di vista esclusivamente termico l'S46 si conferma il più performante grazie alla conducibilità e calore latente maggiori, ma comunque non sufficientemente alti (come visto nelle prove dell'impianto HETNA-PCM) e con i limiti di funzionamento già descritti in precedenza.

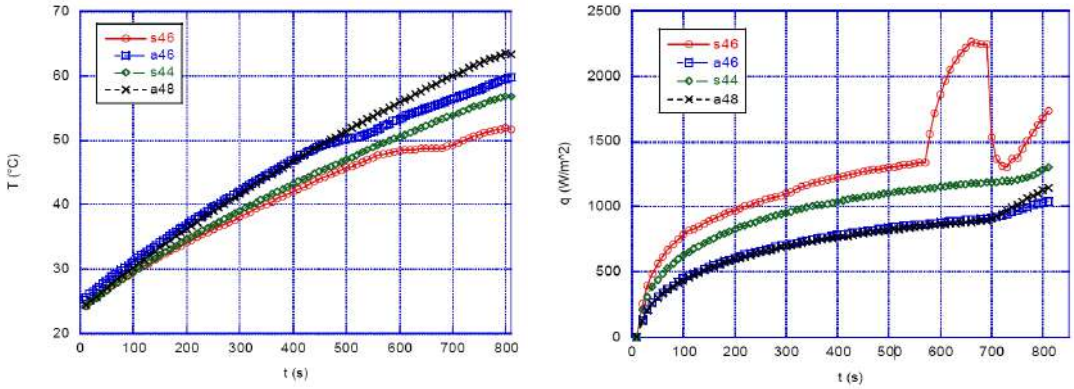


Figura 435. Confronto dell'andamento di temperatura (a sinistra) e del flusso termico (a destra) per diversi materiali a cambiamento di fase

Conclusioni

L'utilizzo dei PCM nel serbatoio dell'impianto di "solar heating and cooling a servizio dell'edificio F-92" comporta l'alternarsi di periodi di fusione (accumulo di energia in eccesso) e la solidificazione (rilascio dell'energia accumulata). Questo si verifica se la temperatura del fluido primario nel primo periodo è sufficientemente superiore a quella di cambiamento di fase del PCM (T_{PC}), e se nel secondo periodo essa scende a valori abbastanza bassi rispetto alla T_{PC}. Inoltre è necessario che questi periodi durino un tempo sufficiente a far cambiare di fase tutto o almeno una parte consistente del materiale, per sfruttarne il calore latente di fusione.

Le prove sperimentali e le relative simulazioni eseguite sul tubo di PCM reale hanno dimostrato che, a causa della bassa conducibilità, i tempi necessari per avere miglioramenti consistenti sull'accumulo di energia possono essere troppo lunghi, spesso molte ore. Si è allora cercato di aumentare la conducibilità del materiale inserendolo in una matrice solida molto più conduttiva. I risultati ottenuti sono incoraggianti, con la conducibilità aumentata di quasi il 500%, valore che però ancora non assicura una risposta tale da compensare la perdita di rendimento dell'accumulo alle altre temperature, quando il cambiamento di fase non avviene. Un altro aspetto evidenziato dai risultati ottenuti, è l'importanza della parete del contenitore del PCM, attualmente di materiale plastico, che contribuisce in maniera non trascurabile ad aumentare i tempi necessari per il cambiamento di fase.

I risultati dell'attività del subtask a.1 sono illustrati nei rapporti RdS/PAR2013/156 e RdS/PAR2013/157.

a.2 Studio e applicazione delle vapor chamber nei sistemi solari termici

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, che ha curato la modellazione dei collettori solari termici dotati di vapor chamber confrontando i risultati ottenuti dalle prove sperimentali svolte da ENEA con quelli ottenuti come output del modello sviluppato.

ENEA si è occupata della progettazione di un innovativo prototipo di collettore solare termico che consente l'eliminazione dell'antiestetico accumulo separato esterno (bollitore) integrandolo nel collettore stesso, collaborando con la Ditta fornitrice del prototipo (Turco Group Srl) per la realizzazione dello stesso. ENEA ha inoltre eseguito dei test sperimentali su sezioni di prova sviluppate appositamente per valutare l'efficacia delle vapor chamber pensate a servizio di questo nuovo tipo di collettore solare termico innovativo.

I collettori o pannelli solari sono il cuore di un impianto solare termico: il loro scopo è infatti di trasformare la radiazione solare in energia termica tramite un fluido termovettore che attraversa il collettore stesso. Il collettore solare termico è quindi un dispositivo in grado di "raccogliere" una frazione della potenza solare incidente trasformandola in potenza termica fornita ad un fluido termovettore. Ne esistono di diversi modelli con campi di applicabilità profondamente diversi, ma lo schema principale di funzionamento è pressoché lo stesso per tutti.

La parte principale è costituita da una piastra captante capace di massimizzare la quantità di radiazione solare assorbita trasformandola in calore. A stretto contatto con la piastra captante circola il fluido termovettore che raccoglie il calore prodotto per condurlo all'utilizzatore.

I collettori solari piani sono i principali pannelli stazionari fra i primi ad essere stati realizzati e sicuramente i più utilizzati. Consentono di produrre acqua calda a temperature relativamente basse (dai 25 °C per collettori scoperti ai 70 °C per collettori con doppia copertura e vernici selettive). L'elemento principale è l'assorbitore, che ha la funzione di assorbire la radiazione solare incidente a onde corte e di trasformarla in calore (trasformazione fototermica).

Solitamente il collettore è composto da un metallo con buona capacità di condurre il calore (per esempio il rame) e dovrebbe riuscire a trasformare il più possibile la radiazione solare in calore. Possono essere impiegati assorbitori dotati di un cosiddetto strato selettivo, che determina un alto grado di assorbimento ($a > 0,95$) nell'intervallo delle lunghezza d'onda della radiazione solare e contemporaneamente irradiano poca energia, grazie a un basso fattore di emissività ($e < 0,1$) nelle lunghezze d'onda della radiazione termica. Gli strati selettivi possono essere ottenuti con procedimento galvanico (cromo, alluminio con pigmentazione al nickel) oppure applicati sotto vuoto.

Un buon contatto termico tra l'assorbitore e i tubi ove scorre il fluido termovettore in circolazione permette la cessione del calore al fluido termovettore e di conseguenza il trasporto fuori dal collettore del calore pronto per essere usato. Per ridurre le dispersioni termiche e per migliorare il rendimento del collettore, l'assorbitore viene provvisto di una copertura trasparente frontale, mentre lateralmente e sul retro viene coibentato.

Relativamente ai principali elementi costitutivi, sopra il pannello si trova la copertura, una piastra che copre frontalmente la piastra captante che è il cuore del pannello; la sua funzione è quella di captare la massima radiazione solare e di trasformarla in calore, limitando al minimo le perdite dello stesso. È realizzata normalmente in rame o acciaio ed è trattata superficialmente con vernici scure e opache o addirittura selettive, per ottenere alta assorbanza nel campo del visibile e bassa emittanza per le alte lunghezze d'onda. Sotto la piastra captante a stretto contatto ci sono i tubi, talvolta addirittura saldati con essa, per ottenere il miglior scambio termico possibile. Sono attraversati dal fluido termovettore che viene condotto all'accumulo. Tutt'intorno e sotto il "cuore" del pannello viene posto un isolante per separare la piastra assorbente e i tubi dalla scatola di contenimento. Deve limitare essenzialmente le perdite per conduzione. È realizzato in materiali con struttura porosa, generalmente poliuretano, lana di poliestere, lana di vetro o lana di roccia. Per evitare l'umidità spesso è rivestito con un foglio di alluminio che ferma la condensa. La scatola di contenimento: raccoglie tutti i componenti del collettore conferendogli compattezza e resistenza meccanica, nonché protezione da sporco ed agenti atmosferici. È realizzata generalmente in acciaio inossidabile, alluminio anodizzato e, più raramente, in vetro resina. Infine il fluido termovettore la cui funzione è quella di trasportare il calore dalla piastra captante, attraverso i tubi, all'utilizzatore. È necessario che abbia un'elevata densità per limitare le dimensioni dei tubi, un alto calore specifico e che non eserciti un'azione corrosiva sulle pareti dei tubi, deve essere inoltre stabile e chimicamente inerte per le temperature di utilizzo. In caso di sistemi aperti, cioè in cui il fluido passante nel pannello sia lo stesso utilizzato dall'utente, il fluido utilizzato è acqua di rete, con problemi di congelamento nei mesi invernali e nelle ore notturne.

In Figura 436 viene riportata la fotografia di un pannello solare a pannelli piani con l'antiestetico serbatoio di accumulo di cui si vuole l'eliminazione.

Il nuovo pannello solare

Sempre più spesso la limitazione principale dell'uso degli impianti di riscaldamento a pannelli solari piani è il divieto posto da molti comuni di installare pannelli solari piani con serbatoi di accumulo esterni, in quanto antiestetici specie se posti in centri storici di particolare rilievo paesaggistico. Per ovviare a ciò è stato messo a punto un sistema che prevede un pannello integrato in cui la funzione di serbatoi di accumulo viene svolta dal pannello solare stesso, risultando così senza brutte appendici esterne.



Figura 436. Sistema solare a circolazione naturale per la produzione di acqua calda sanitaria con collettori solari piani idraulicamente connessi a un bollitore d'accumulo

La differenza è uno spessore lievemente maggiore (180 mm rispetto ai 105÷126 mm) del pannello, ottimizzabile in fase d'industrializzazione. Usando una particolare conformazione fra la piastra ricevente, il tubo assorbente ed il serbatoio sottostante si riesce ad evitare anche l'uso di apparecchiature di movimento del fluido, solamente utilizzando la convezione naturale che si instaura nell'elemento singolo del pannello solare.



Figura 437. Schema del singolo elemento del nuovo pannello solare

La soluzione del problema viene fatta posizionando dei piccoli serbatoi, posti al di sotto del tubo ricevitore, uno per ogni tubo ricevente (Figura 437). In tal modo il grosso serbatoio esterno viene sostituito da tanti piccoli serbatoi interni al pannello stesso, la somma dei volumi è tuttavia la stessa del volume che si aveva in precedenza per il serbatoio esterno.

Per semplificare la struttura del pannello solare e ridurre in modo sensibile i costi di produzione, la circolazione del fluido vettore, nel nostro caso la stessa acqua di rete che poi sarà disponibile all'utilizzatore, sarà solamente per circolazione naturale dovuto alla differenza di densità fra l'acqua riscaldata nel tubo ricevitore e l'acqua fredda nel tubo collettore. Quindi il pannello solare integrato di serbatoio si presenta come in Figura 438, in cui vengono mostrati alcuni particolari realizzativi. I serbatoi interni sono poi collegati direttamente all'acqua di rete ed all'utenza di acqua calda. Quando c'è la richiesta di acqua calda essa viene prelevata dal tubo serbatoio, e nello stesso tempo viene reintegrata nello stesso tubo, dall'acqua di rete fredda.

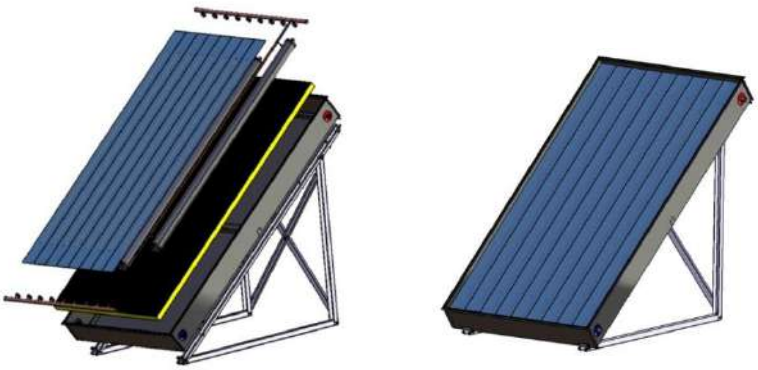


Figura 438. Il nuovo pannello solare

Realizzazione del pannello solare

La sezione di prova consiste in un solo modulo del pannello solare, debitamente strumentato. Per eseguire le prove sperimentali si fa uso di una resistenza elettrica a filo posta sopra il tubo ricevitore che simula la radiazione solare incidente per non dipendere dalle condizioni atmosferiche esterne. Per questo motivo in questa sezione di prova è assente la piastra assorbente. In Figura 439 viene mostrata una foto della sezione di prova, opportunamente coibentata per evitare dannose dispersioni di calore verso l'esterno. Il diametro esterno del tubo ricevitore usato è di 8 e 10 mm.

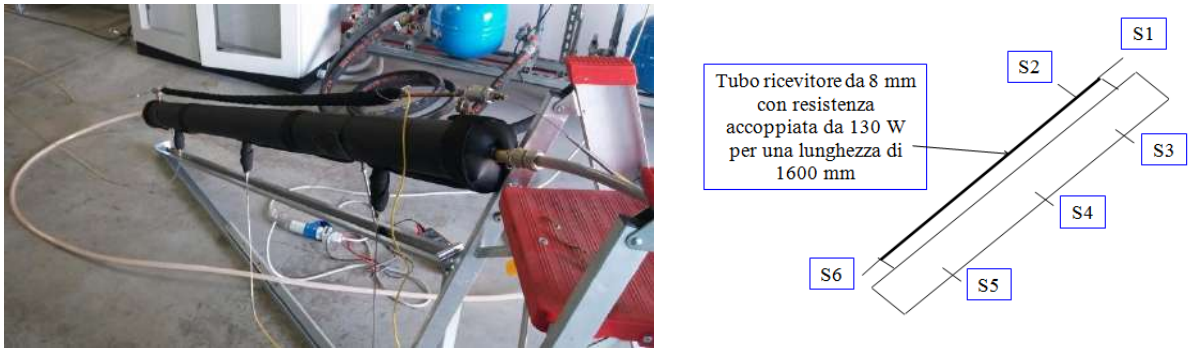


Figura 439. Dispositivo per prove effettuate su tubo singolo e schema disposizione delle sonde di temperatura nel modulo

Le sonde di temperatura sul singolo tubo sono posizionate come mostrato in figura, esse sono termocoppie di tipo K da 1 mm e da 3 mm. La prova viene effettuata dando potenza sempre crescente alla resistenza a filo posta sopra il tubo ricevitore, la potenza viene misurata con un misuratore di potenza elettrica LOVATO DMG 700. In questo primo caso si simula la presenza della piastra assorbente senza la vapor chamber: quindi la resistenza è posata su tutto il tubo per una lunghezza totale di 1600 mm. L'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale è stato variato ed è pari a 15°, 30° e 45°. Tutto il sistema è stato isolato con uno spessore di 10 mm di neoprene. Il sistema di acquisizione è National Instrument compact FielPoint.

Simulazione con codice di termofluidodinamica

Simulazioni termofluidodinamiche sul collettore solare a circolazione naturale sono state compiute dall'Università di Padova utilizzando il codice di calcolo Fluent.

Come si può notare dalla Figura 440, è stata sfruttata la simmetria della geometria per limitare la simulazione a metà dominio, permettendo una mesh migliore ed un risparmio computazionale.

La simulazione è stata compiuta in regime transitorio dal momento che le grandezze fisiche che governano il fenomeno fisico sono dipendenti dal tempo. Le proprietà termo fisiche del fluido all'interno del collettore (densità, conducibilità, viscosità dinamica e calore specifico) sono state interpolate con un polinomio da dati ottenuti dal database Refprop 9.

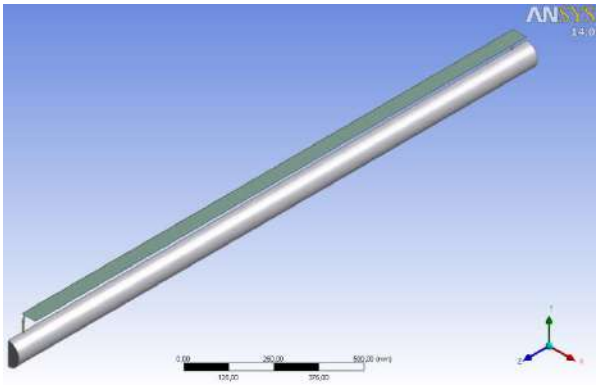


Figura 440. Geometria del collettore solare riportato in Fluent

Nella simulazione è stato considerato l'effetto della gravità, la cui direzione è funzione dell'angolo di inclinazione del collettore solare, ed un regime di deflusso di tipo laminare, dal momento che nella circolazione naturale i valori di velocità raggiunti dal fluido sono molto bassi (~10^{-2} m s^{-1}). Come condizioni iniziali sul fluido si è imposta una temperatura di 27° C ed una velocità nulla. Le condizioni al contorno sono:

- flusso termico pari a 800 W m^{-2} imposto su piastra su una superficie di 1600 mm x 106 mm;
- flusso termico nullo imposto sulle superfici esterne restanti (ipotesi di adiabaticità verso l'esterno).

Per l'inclinazione del collettore è stato scelto un valore di riferimento pari a 45°.

La simulazione è stata divisa in due step temporali: nei primi 10 minuti, dal momento che si ha l'innesco della circolazione naturale, si è scelto uno step temporale di 5 secondi, mentre nell'intervallo dai 10 minuti alle 2 ore si è scelto uno step temporale di 30 secondi. Questa scelta è stata fatta perché nei primi istanti si ha un impulso di temperatura e di velocità, quindi le grandezze fisiche variano in tempi brevi, mentre successivamente (come viene mostrato nei risultati) si ha un aumento della temperatura ed una diminuzione della velocità molto più graduale, permettendo, quindi, di aumentare lo step temporale.

Nella Figura 441 si nota che nel collettore solare si è innescato il fenomeno della convezione naturale, la quale, causata dalla differenza di temperatura del fluido e dall'azione della gravità sullo stesso, permette la sottrazione di fluido freddo dalla parte bassa del serbatoio e la fornitura di fluido caldo nella parte alta del serbatoio. Col passare

del tempo nel serbatoio si crea una stratificazione termica ed un fronte di fluido caldo che avanza dalla parte superiore alla parte inferiore del serbatoio.

Nella Figura 442 si riportano i punti in cui sono stati calcolati i valori della temperatura e della velocità del fluido.

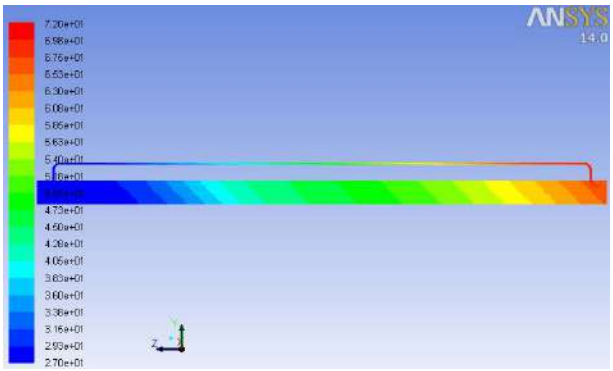


Figura 441. Distribuzione delle temperatura all'interno del collettore solare ad un istante di tempo pari a 2 ore

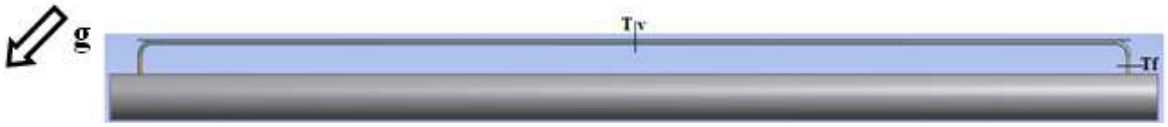


Figura 442. Punti di lettura della temperatura e della velocità del fluido all'interno del collettore solare

In Figura 443 sono mostrati gli andamenti di temperatura e velocità calcolati per i punti evidenziati in figura 442. Nei primi 600 s si notano grandi variazioni di temperatura e di velocità, questo è dovuto all'innesco della convezione naturale. Questo spiega il perché nei primi 600 s si è preferito usare una mesh temporale più fitta rispetto agli istanti successivi.

Nella convezione naturale i campi di temperatura e di velocità sono strettamente vincolati tra di loro, infatti nei primi istanti creandosi un'alta disuniformità di temperatura tra la parte inferiore e superiore del collettore si hanno velocità più alte, invece quando il fronte di fluido caldo avanza dalla parte superiore a quella inferiore del serbatoio, uniformandosi il campo di temperatura, la velocità diminuisce.

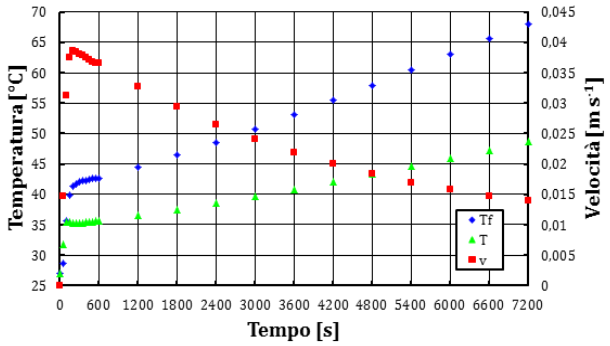


Figura 443. Andamento della temperatura T e Tf e della velocità del fluido all'interno del collettore solare

Modello dinamico del collettore

Presso l'Università di Padova è stato inoltre sviluppato un modello MATLAB/Simulink del collettore. Tale modello risponde all'esigenza di disporre di uno strumento snello e veloce per capire le possibili risposte del dispositivo al variare delle condizioni operative e della geometria. Infatti, l'implementazione della mesh di calcolo nel codice CFD richiede molto lavoro e il successivo sforzo computazionale per la conduzione della simulazione è molto oneroso, anche in termini di tempo necessario per ottenere dei risultati. Perciò, il collettore, inteso inizialmente come singolo circuito, è stato modellato in ambiente MATLAB/Simulink per mezzo di un modello bidimensionale dinamico. L'intera struttura è stata pertanto ridotta a una rete di "nodi", piccoli volumi di controllo per mezzo dei quali è stata possibile la discretizzazione spaziale del dispositivo: ad ogni nodo corrisponde una determinata

equazione di bilancio termico, che ne descrive l'evoluzione termica nel tempo. Tra i vari nodi sono presenti le resistenze termiche che governano lo scambio termico, ed ogni nodo in sé rappresenta una capacità termica. Quindi il collettore può essere visto, ai fini del modello, come una maglia di resistenze e capacità termiche.

L'aspetto complicato è rappresentato dal fatto che la convezione nel circuito è di tipo naturale e dipende pertanto dal bilancio fluidodinamico tra battente idraulico, dato dal gradiente di densità, forze di attrito nei condotti e forza di gravità. Tale bilancio è strettamente connesso alla configurazione termica, in quanto il gradiente di densità è dato dal gradiente termico dell'acqua che scorre nel circuito, il quale a sua volta dipende anche dalla portata che si instaura in ogni istante (scambio termico per convezione all'interno dei condotti). Bilancio termico e bilancio fluidodinamico risultano pertanto strettamente connessi e interdipendenti l'uno dall'altro.

Per semplicità il dispositivo è stato schematizzato senza tener conto dei tratti di collegamento tra canale, nel quale avviene il riscaldamento dell'acqua a contatto con la piastra, e serbatoio di accumulo sottostante.

Sono state individuate diverse tipologie di nodo, omogenei per struttura e tipologia di scambio termico cui sono soggetti, in questo modo:

- i nodi che rappresentano volumi di controllo sulla piastra, detti nodi "aletta";
- i nodi che rappresentano volumi di controllo sul tubo a contatto con la piastra, denominati nodi "pipe";
- i nodi che rappresentano volumi di controllo sul circuito acqua, detti nodi "water".

Ciascun componente è stato discretizzato in piccoli elementi in direzione assiale, il cui numero, per poter avere risultati con accuratezza accettabile, risulta abbastanza elevato (intorno alle migliaia). L'intera piastra tuttavia è stata suddivisa anche in direzione traversale, cioè in larghezza è stata suddivisa in tre parti: quelle laterali larghe 30 mm, mentre quella centrale è larga 46 mm. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di tener conto del reale andamento della temperatura lungo la larghezza della piastra. La temperatura non è infatti costante su questa direttrice e suddividere la piastra in nodi di larghezza pari a quella totale significherebbe assegnare una temperatura costante su tutta la larghezza.

Il sistema è stato modellato come perfettamente adiabatico, per semplicità e per poter confrontare i risultati dati dal modello con quelli derivanti dalle simulazioni eseguite con codice di calcolo Fluent, fatte anch'esse in questa condizione. È stata trascurata l'inerzia termica costituita dalla struttura del serbatoio in acciaio per non appesantire eccessivamente il modello; questa assunzione non dovrebbe comportare grossi errori, in quanto l'inerzia termica data dalla massa di acqua in esso contenuta risulta dominante. Nel modello non è stato considerato lo strato di isolante dato che la simulazione è stata condotta in condizione di adiabaticità (così come in Fluent).

Per omogeneità con le prove sperimentali effettuate, al modello del dispositivo sono state applicate le seguenti condizioni al contorno:

- temperatura iniziale del fluido: 27 °C;
- portata volumetrica iniziale del fluido: 0 $m^3 s^{-1}$;
- adiabatico verso esterno;
- flusso termico imposto costante pari a 800 W m^{-2} su una lunghezza della piastra pari a 1600 mm;
- deflusso laminare.

Validazione del modello e confronto tra simulazioni e dati sperimentali

Il modello del collettore in MATLAB/Simulink è stato validato confrontando i risultati per una configurazione geometrica semplice con le simulazioni in Fluent e i dati sperimentali.

Nella Figura 444 si può notare un buon accordo tra l'andamento ottenuto da Fluent e quello ottenuto dal modello teorico in MATLAB/Simulink. Per la prova sperimentale si osserva un buon accordo nei primi istanti di tempo, mentre negli istanti successivi si ha uno scostamento tra quest'ultima e gli altri due andamenti. Ciò può essere dovuto all'effetto delle dispersioni termiche, poiché nella prova sperimentale lo spessore di isolante utilizzato nella prova sperimentale risulta non sufficiente a garantire la adiabaticità verso l'esterno ipotizzata nelle simulazioni e nel modello. Tuttavia, il trend simulato e il trend ottenuto dal modello teorico riproducono l'andamento delle temperature sperimentali, a meno delle possibili

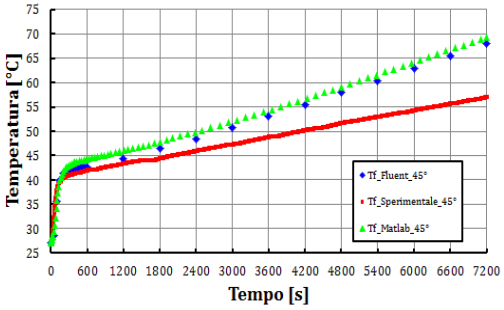


Figura 444. Confronto tra gli andamenti della temperatura del fluido alla fine del canale da 10 mm nella simulazione in Fluent, nel modello in MATLAB/Simulink e nella prova sperimentale

dissipazioni nell'apparecchiatura sperimentale.

Uso della "vapor chamber"

L'uso della vapor chamber (essenzialmente un "flat heat pipe") posta fra la piastra assorbente ed il tubo ricevitore favorisce l'instaurarsi del moto convettivo che fa da pompa al fluido vettore. Le vapor chamber sono una nuova e avanzata applicazione di scambio termico derivante dalla più ben nota tecnologia degli Heat Pipe. Le vapor chamber sono capaci di elevatissimi flussi di scambio termico, anche pari a circa 350 W/cm^2.

Il principio di funzionamento è mostrato in Figura 445. All'interno della vapor chamber viene inserita una piccola quantità di liquido che a contatto con la parete calda vaporizza e si diffonde all'interno, quando il vapore scambia con la parete fredda si condensa ritornando allo stato liquido. Il materiale capillarizzato presente all'interno fornisce il movimento al liquido sfruttando le forze capillare così da riportare il liquido a contatto con la parete calda, re-iniziando il ciclo termico che fa aumentare il calore scambiato dal dispositivo.

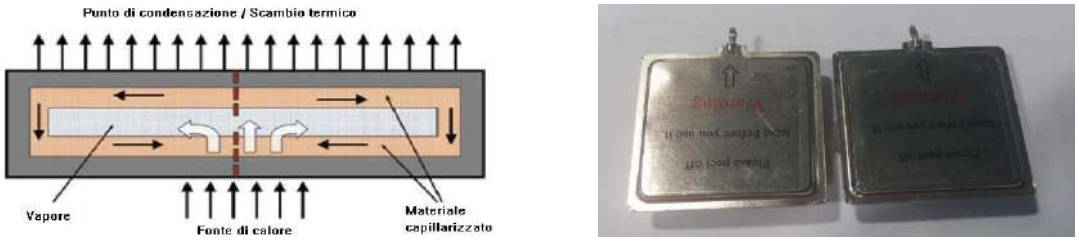


Figura 445. Principio di funzionamento e foto della vapor chamber

L'uso della vapor chamber consente un salto di temperatura maggiore lungo l'asse del tubo ricevitore e questo favorisce la circolazione naturale che si deve instaurare fra il tubo ricevitore ed il sottostante tubo serbatoio.

In Figura 445 viene mostrata una foto delle due vapor chamber utilizzate; le loro dimensioni sono pari a 45x45x3,5 mm^3. Tali dispositivi sono stati applicati ad un collettore singolo, per l'esecuzione delle prove sperimentali.

Simulazioni del collettore con vapor chamber integrata

Sono state effettuate anche simulazioni in Fluent del collettore solare con la vapor chamber integrata.

Dallo studio teorico del comportamento della vapor chamber e del suo effetto di miglioramento dello scambio termico lungo l'aletta della piastra posta sul canale da 10 mm, si è deciso di simulare tale vapor chamber come un corpo ad alta conduttanza termica, largo come la piastra e lungo 5 cm.

Nella simulazione tale vapor chamber è stata posta a circa 160 mm dalla parte superiore del collettore. Le condizioni iniziali e le condizioni al contorno sono le stesse delle simulazioni già presentate in precedenza. Nella Figura 446 viene mostrata la geometria del collettore singolo con vapor chamber integrata simulata tramite il codice Fluent.

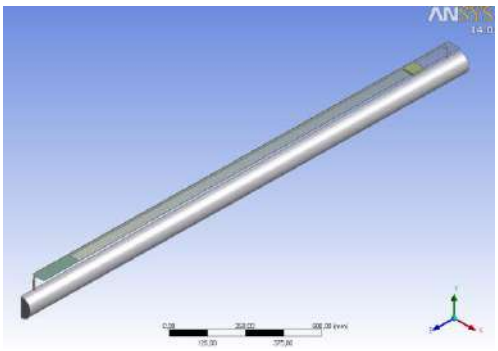


Figura 446. Geometria del collettore solare riportato in Fluent con vapor chamber

Test preliminari prototipo pannello solare termico

In Figura 447 una foto effettuata durante i test sperimentali del prototipo realizzato, effettuati presso il C.R. ENEA di Trisaia, laboratorio di qualificazione componenti solari. Il Laboratorio del Centro ENEA Trisaia è attrezzato anche per eseguire tutte le prove previste dalla normativa europea ed internazionale di settore, sia per quanto attiene i test su collettori solari (EN 12975-2 ed ISO 9806) sia per quanto riguarda i sistemi solari per la produzione di acqua calda sanitaria (EN 12976-2 ed ISO 9459-2). I risultati dei test preliminari sono dettagliati nel rapporto RdS/PAR2013/158.



Figura 447. Prototipo collettore solare termico: test preliminari

Conclusioni

Le prove effettuate hanno permesso di verificare il buon funzionamento del nuovo tipo di collettore solare con serbatoio integrato al suo interno. L'instaurarsi della convezione naturale, che rende possibile la circolazione dell'acqua all'interno del sistema, ed il raggiungimento di elevate temperature, che rendono possibile l'utilizzo della "acqua calda" da parte dell'utente, ci dimostrano la convenienza del nuovo tipo di collettore solare. Le limitazioni alla sperimentazione non hanno consentito di ottimizzare il sistema, soprattutto nell'ultima fase sperimentale con l'uso delle vapor chamber applicate sotto alla piastra assorbente la radiazione solare. Una migliore progettazione ed un programma di prove più completo darebbero più certezze sull'uso della nuova tecnologia, inoltre consentirebbe di rendere più accurata la simulazione sia con i codici di calcolo che con il programma sviluppato dall'università di Padova.

Le attività svolte e risultati ottenuti sono riportati in dettaglio nei rapporti RdS/PAR2013/158 e RdS/PAR2013/159.

a.3 Test funzionale delle performance di un prototipo di condizionatore d'aria compatto, alimentato ad energia solare (solar DEC)

L'attività di ricerca ha avuto come oggetto di studio un innovativo impianto solar DEC individuato dall'acronimo FREESCOO (FREE Solar COOling).

Sono stati testati due prototipi di solar DEC di taglia diversa e dedicati ad utenze di diversa destinazione d'uso: residenziale e terziario. In particolare, presso il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici (DEIM) di Palermo è stata installata una unità residential e presso il C.R ENEA di Casaccia una unità office le cui caratteristiche sono di seguito descritte.

Caratteristiche principali modello **FREESCOO residential**
Superficie collettori solari: 2,4 m^2 Dimensioni in pianta: 1,2 x 2 m^2 Portata d'aria immessa in ambiente: 500 m^3/h Portata d'aria di rinnovo: 250 m^3/h Potenza frigorifera max: 2,7 kW (T_{est} = 35 °C x_{est}*=14 g/kg) Potenza elettrica assorbita: 0,15 kW
Caratteristiche principali modello **FREESCOO office**
Superficie collettori solari: 4,8 m^2 Dimensioni in pianta: 2,4 x 2 m^2 Portata d'aria immessa in ambiente: 1000 m^3/h Portata d'aria di rinnovo: 500 m^3/h Potenza frigorifera max: 5,5 kW (T_{est} = 35,°C x_{est} =14 g/kg) Potenza elettrica assorbita: 0,25 kW

*x_{est} = titolo dell'aria esterno



L'attività di ricerca è stata quindi svolta con il contributo dell'Università di Palermo che ha curato il monitoraggio e l'ottimizzazione del sistema FREESCOO residential, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni di tipo residenziale. ENEA ha realizzato un impianto sperimentale presso il C.R ENEA di Casaccia al fine di testare e quindi sperimentare il sistema FREESCOO office, alimentato ad energia solare e dedicato ad applicazioni tipo uffici. Il sistema infatti è pensato per effettuare il ricambio e il trattamento dell'aria a costo energetico nullo.

Le differenze principali tra le macchine installate sono legate essenzialmente alla diversa taglia e configurazione interna. In particolare, per ciò che concerne la configurazione dei componenti, l'unità FREESCOO office si presenta suddivisa in due moduli diversi. Uno è relativo alla parte di ciclo che realizza la deumidificazione dell'aria, l'altro è relativo al raffreddamento dell'aria trattata. L'unità FREESCOO residential è costituita invece da un unico modulo in cui si realizza l'intero ciclo termodinamico. L'unità office ha una portata d'aria nominale doppia e pari a 1000 m^3/h rispetto all'unità residential che invece ha una portata d'aria di 500 m^3/h.

FREESCOO Residential

L'unità FREESCOO residential è stata posizionata sul lastrico solare del DEIM a servizio di un locale di circa 190 m^3 posto al secondo piano dell'edificio e occupato da sei persone.

Le attività di ricerca svolte sull'unità residential si sono concentrate soprattutto sui seguenti aspetti:

1. Caratterizzazione delle prestazioni dei letti adsorbenti con riferimento all'accumulo di energia sotto forma di capacità di adsorbimento. Questo aspetto è particolarmente importante nel caso di una applicazione del sistema in ambito residenziale dove la richiesta di climatizzazione è spesso concentrata nelle ore del tardo pomeriggio/sera;
2. Analisi della regolazione della potenza frigorifera;
3. Verifica della capacità di funzionamento in modalità stand-alone.

L'unità installata presso il DEIM si presenta a prima vista come un collettore solare piano per il riscaldamento di acqua sanitaria, nel cui volume sottostante è presente la macchina di trattamento dell'aria funzionante con tecnologia DEC. Il sistema ha la caratteristica di essere dunque particolarmente compatto ospitando tutti i componenti utilizzati nel ciclo termodinamico all'interno del volume compreso tra il piano orizzontale e quello inclinato del collettore solare. Il sistema svolge le funzioni di ventilazione, deumidificazione e raffreddamento dell'ambiente a cui è collegato. Nella stagione invernale è utilizzabile, inoltre, anche con funzione di riscaldamento quando vi è disponibilità di calore solare.

Il sistema utilizza la tecnologia del tipo DEC a letti fissi raffreddati o CPB (Cooled Packed Bed) grazie alla quale è possibile massimizzare la capacità di adsorbimento del materiale essiccante utilizzato per la deumidificazione dell'aria e di prolungare il funzionamento del sistema anche per diverse ore dopo il tramonto del sole.

Sull'idea alla base del sistema è depositata una domanda di brevetto per invenzione industriale presso l'Ufficio Brevetti della Camera di Commercio di Catania N. CT2012 A000013 alla quale è seguita l'estensione a livello internazionale sotto forma di PCT (PCT/IB2013/058322).

I componenti principali sono il collettore solare ad aria ibrido termico/fotovoltaico, due letti adsorbimenti al gel di silice, una torre di raffreddamento integrata, due scambiatori di calore evaporativi a piastre, due ventilatori, due circolatori d'acqua e altri piccoli attuatori necessari per realizzare il processo di trattamento dell'aria.

La potenza di raffreddamento legata al trattamento dell'aria è variabile in base alle condizioni operative (radiazione solare disponibile, temperatura e umidità dell'aria esterna, ecc.) e può raggiunger circa 2,7 kW alle condizioni dell'aria esterna T_{est} = 35 °C, x_{est} = 14 g/kg. Il sistema garantisce un rinnovo dell'aria pari al 33% della portata d'aria trattata e corrispondente ad un ricambio d'aria di circa 0,85 L/h.

Per assicurare un funzionamento continuo del sistema sono presenti due letti essiccanti, cosicché mentre uno lavora per deumidificare l'aria, l'altro viene riattivato utilizzando il calore solare. Dopo un certo tempo di funzionamento il sistema di controllo automatico inverte il funzionamento dei due letti in modo tale da utilizzare il letto appena riattivato per deumidificare l'aria, sottoponendo l'altro alla sua riattivazione.

Ciascun letto adsorbente è costituito da una batteria alettata del tutto simile a quelle comunemente utilizzate in applicazioni di condizionamento dell'aria, in cui gli spazi tra le alette sono riempiti con circa 13 kg di gel di silice in granuli. Il materiale adsorbente può pertanto essere raffreddato mediante il circuito ad acqua della batteria stessa che è collegato ad una torre evaporativa utilizzata per dissipare il calore di condensazione che si sviluppa durante la fase di deumidificazione dell'aria. Il letto adsorbente è in grado di accumulare energia solare (sotto forma di capacità di adsorbimento) per garantire una continuità del servizio anche in assenza di radiazione per un periodo di tempo variabile dell'ordine di 3-5 ore. La rigenerazione del gel di silice presente nel letto adsorbente viene effettuata utilizzando un collettore solare ad aria.

L'assorbimento elettrico massimo del sistema, relativo alla movimentazione dell'aria e dell'acqua in circolo, è pari a circa 150 W. Il controllo della velocità di rotazione dei ventilatori permette la regolazione della potenza frigorifera della macchina. L'energia elettrica necessaria viene autoprodotta all'interno del sistema da un pannello fotovoltaico integrato all'interno del collettore solare ad aria da 168 W di potenza di picco. Al fine di garantire il funzionamento del sistema anche dopo il tramonto del sole, è presente un sistema di accumulo da 65 Ah a 24 V. Tutti gli utilizzatori elettrici funzionano in corrente continua a 24 V. Ciò equivale a dire che in questa modalità il sistema necessita per funzionare solo di acqua e sole. Nel caso in cui invece l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico e accumulata nelle batterie non sia sufficiente ad alimentare gli utilizzatori, il sistema di controllo aziona automaticamente un alimentatore collegato alla rete elettrica.

In Figura 448 mostra uno schema del sistema, mentre in Figura 449 sono riportate le caratteristiche del ciclo termodinamico e del processo di trattamento dell'aria.

Una portata di aria esterna (1) attraversa uno dei letti adsorbenti dove è deumidificata e parzialmente raffreddata. Grazie alla simultanea trasmissione del calore e di massa, la deumidificazione è effettuata a temperatura pressoché costante (2). Successivamente, l'aria deumidificata viene miscelata con aria di ritorno dall'edificio [in condizioni (6)], raggiungendo le condizioni di cui al punto (3). L'aria miscelata, che ha una portata pari a 150% della

portata dell'aria fornita all'edificio, entra negli scambiatori evaporativi raggiungendo le condizioni di cui al punto (4).

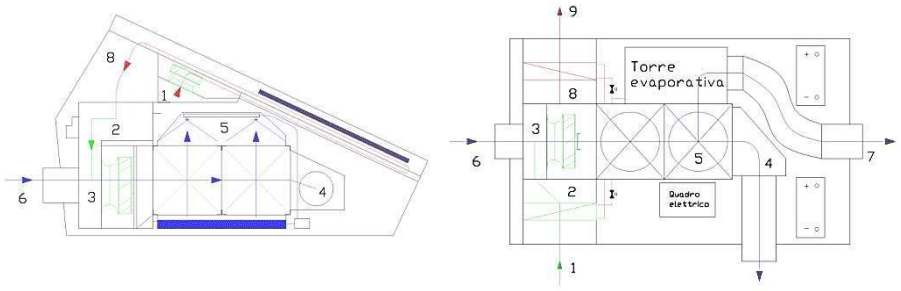


Figura 448. Schema di funzionamento dell'unità installata FREESCOO residential

Per produrre l'effetto di raffreddamento, all'uscita del secondo scambiatore evaporativo, una parte della portata d'aria pari al 50% è deviata verso il ramo secondario del pacco di scambiatori stessi. L'energia termica dovuta al processo di adsorbimento nel letto viene ceduta attraverso un circuito idraulico collegato alla torre di raffreddamento integrata nel sistema. L'aria che fluisce attraverso la torre di raffreddamento proviene dal lato secondario del pacco di scambiatori evaporativi o dall'esterno. In questo ultimo caso, mostrato in Figura 449, è necessario un ventilatore supplementare per la torre di raffreddamento

		Descrizione	x g/kg	T °C	h kJ/kg
Aria di processo	1	Aria esterna	16,0	35,0	76,2
	2	Letto adsorbente	9,0	33,0	56,2
	3	Miscelazione	10,0	29,0	54,7
	4	HX1 + HX2	10,0	20,0	45,5
Edificio	6	Aria di ritorno	10,5	27,0	53,9
Aria secondaria negli scambiatori di calore evaporativi	4	Prim. HX1+HX2	10,0	20,0	45,5
	5	Second. HX1+HX2	18,5	25,0	72,2
Torre di raffreddamento	5	Ingresso torre	18,5	25,0	72,2
	7	Uscita torre	25,0	29,0	93,0
Aria refrigerata	1	Aria esterna	16,0	35,0	76,2
	8	Collettore solare	16,0	55,0	96,9
	9	Desorbimento	22,0	39,0	95,8

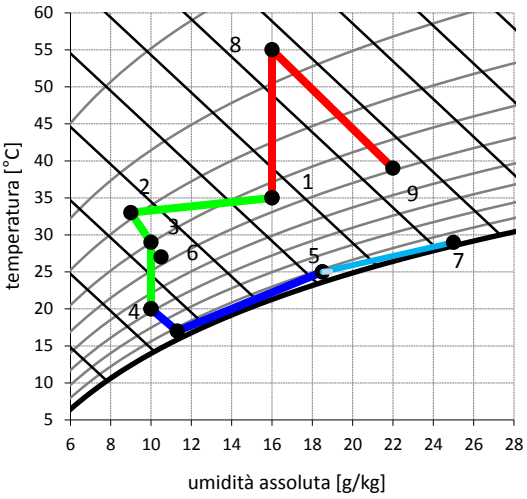


Figura 449. Descrizione del ciclo e diagramma psicrometrico

Se non vi è alcuna necessità di climatizzazione estiva, l'energia solare è utilizzata per rigenerare il materiale adsorbente dei letti deumidificanti. In particolare, un letto viene rigenerato finché la differenza di temperatura tra l'aria in uscita dal collettore solare e l'aria che lascia il letto adsorbente è superiore ad una soglia fissa. Se la differenza è inferiore e il ventilatore del circuito solare è funzionante alla minima velocità, il sistema di controllo esegue una commutazione per attivare la rigenerazione dell'altro letto.

Se il sistema deve operare in modalità di climatizzazione estiva, il ventilatore principale viene utilizzato per fornire aria nelle condizioni di immissione all'edificio. La temperatura e l'umidità dell'ambiente possono essere controllate indipendentemente. La temperatura può essere regolata controllando la velocità del ventilatore principale e lo stato della pompa di ricircolo degli scambiatori di calore evaporativi. L'umidità può essere regolata controllando la velocità del ventilatore e lo stato della pompa della torre di raffreddamento e parzialmente controllando la velocità del ventilatore principale. Una variazione della temperatura del materiale adsorbente si tradurrà in una variazione della capacità di deumidificazione e di conseguenza questo fenomeno può essere utilizzato per regolare l'umidità dello spazio condizionato. Durante il funzionamento in modalità climatizzazione estiva, la strategia di controllo che regola il funzionamento dei due letti adsorbenti si basa sulle condizioni di umidità dell'aria di ritorno. Se il valore soglia di umidità viene superato, il sistema di controllo attiva la procedura di commutazione da un letto all'altro.

Nella fase immediatamente successiva all'installazione del sistema, sono stati svolti diversi test funzionali finalizzati alla verifica e alla messa a punto del sistema di controllo e alla verifica del funzionamento dei singoli componenti. In particolare si è scelto di approfondire il funzionamento del sistema dei letti adsorbenti in quanto questo rappresenta il vero nucleo su cui si basa il sistema.

In Figura 450 si riporta l'andamento delle prestazioni di uno dei due letti adsorbenti testato con una portata dell'aria di 300 m^3/h. Nel grafico è riportata la temperatura di ingresso-uscita (rosso-viola) e l'umidità assoluta dell'aria in fase di adsorbimento (blu-verde). Inoltre nei grafici sono riportate in tratteggiato le temperature dell'acqua in ingresso e uscita dalla torre di raffreddamento (arancione-celeste).

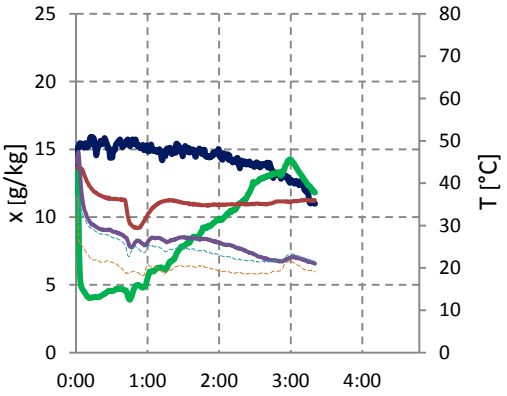


Figura 450. Andamento curve di temperatura aria e acqua batteria ed umidità assoluta dell'aria durante la fase di adsorbimento con portata dell'aria di processo di 300 m^3/h

L'umidità assoluta in ingresso si attesta durante la prova intorno ai 15 g/kg. Si consideri che prima di procedere alla prova si è proceduto a rigenerare completamente il letto con aria di rigenerazione a circa 50 °C.

Si può notare che dopo poco l'inizio della prova si ha un picco di deumidificazione, che corrisponde al minimo della curva verde. Tale punto è raggiunto in pochi minuti, e ciò è dovuto al contributo positivo dato dal raffreddamento del materiale adsorbente che permette di asportare in brevissimo tempo il calore residuo relativo alla fase di rigenerazione precedente e quello che si sviluppa successivamente durante la fase di adsorbimento. Osservando l'andamento delle temperature si nota inoltre che la temperatura dell'aria in uscita è più bassa di quella in ingresso. La differenza tra le due curve inoltre va ad aumentare in quanto col tempo il materiale si va saturando e i fenomeni di adsorbimento diminuiscono, facendo diminuire anche la quota di calore prodotto. Con questa portata il letto garantisce una deumidificazione tale che l'umidità assoluta dell'aria in uscita si mantiene al di sotto dei 10 g/kg per circa 2 ore.

Le prove sull'efficacia dei letti adsorbenti svolte in condizioni reali hanno permesso di caratterizzare il funzionamento del sistema letti adsorbenti e valvola di scambio. Inoltre, in accordo con la Ditta costruttrice, è stata messa a punto una strategia di scambio dei letti adsorbenti che minimizza gli svantaggi dovuti alla inerzia termica dei letti. In particolare, prima di attuare la commutazione tra i letti, viene effettuato un pre-raffreddamento del letto che è stato utilizzato in modalità di rigenerazione, preparandolo per la successiva operazione di adsorbimento.

A causa di ritardi nell'installazione del sistema, non è stato possibile giungere a risultati medi mensili sulle prestazioni del sistema mentre sono state svolte diverse analisi di alcune giornate di funzionamento. Di seguito si riportano alcuni risultati ottenuti durante una delle giornate di test esaminate.

In Figura 451 mostra il dettaglio delle prestazioni di deumidificazione del sistema per un giorno in cui il sistema viene attivato alle ore 12:00 e spento alle ore 20:00. La commutazione tra un letto e l'altro è rappresentata dal valore della variabile "valvola". All'accensione il sistema inizia a funzionare utilizzando il letto rigenerato nelle ore precedenti (Valvola=1) quando, seppure non vi era richiesta di climatizzazione, vi era disponibilità di calore dal collettore solare per la rigenerazione.

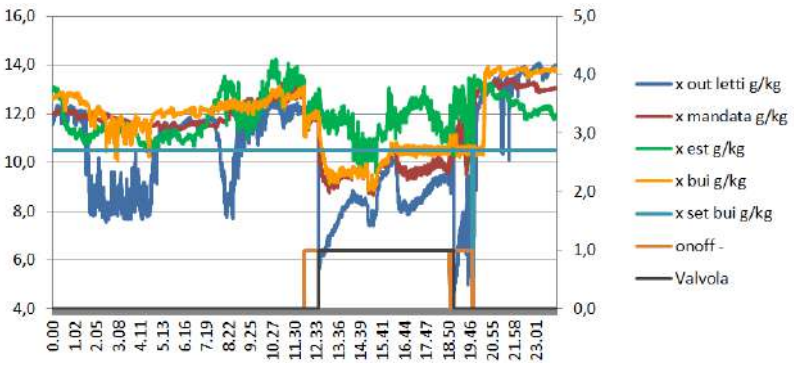


Figura 451. Valori di umidità assoluta dell'aria esterna (verde), dell'aria interna al locale (arancio), dell'aria di mandata (rosso scuro) e dell'aria in uscita dai letti adsorbenti (azzurro)

Come è possibile notare il sistema di controllo mantiene nella stessa posizione la valvola di scambio dei letti ovvero il sistema continua a funzionare utilizzando sempre lo stesso letto mentre l'altro si trova in modalità di rigenerazione. Ciò dimostra che il letto è in grado di deumidificare l'aria in ingresso per diverse ore e fino alle 7 circa quando il sistema commuta sull'altro letto. Il sistema mantiene l'ambiente ad una umidità intorno a 10,5 g/kg corrispondente ad una umidità relativa di circa 50% alla temperatura di 26 °C.

In Figura 452 mostra l'andamento delle prestazioni del sistema in termini di mantenimento della temperatura di immissione T_{outHX} e della temperatura all'interno del locale T_{bui}. Una volta superato il transitorio di raffreddamento del locale, la temperatura di mandata scende raggiungendo valori minimi intorno a 21 °C, la velocità del ventilatore si abbassa e la pompa dello scambiatore di calore evaporativo inizia un funzionamento con cicli di accensione e spegnimento al fine di controllare la temperatura nell'ambiente condizionato.

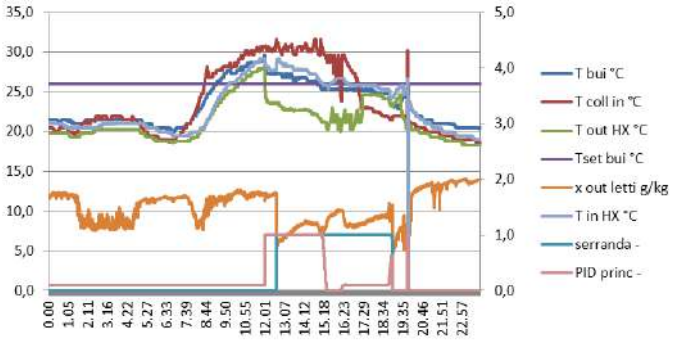


Figura 452. Valori di temperatura nei principali componenti del sistema per il giorno selezionato

In Figura 453 si riportano la potenza frigorifera sviluppata negli scambiatori evaporativi, nei letti adsorbenti e il totale della potenza frigorifera relativa al trattamento dell'aria, insieme all'indice di prestazione EER (Energy Efficiency Ratio). Come si nota il valore della potenza raggiunge un massimo nella prima ora di funzionamento per poi scendere successivamente quando l'ambiente si è raffreddato.

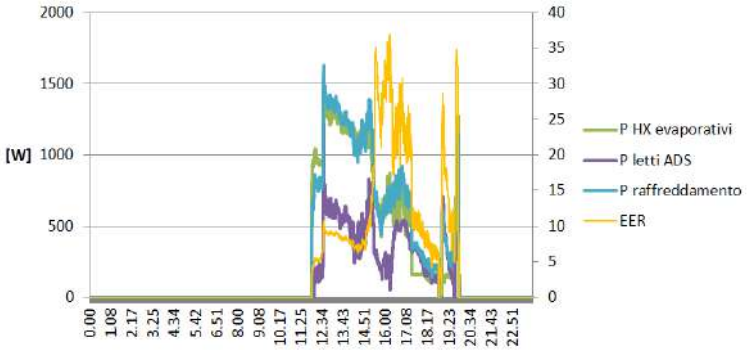


Figura 453. Prestazioni energetiche globali nel giorno di prova selezionato

Per il giorno di funzionamento esaminato, il 34% della potenza frigorifera è correlata alla differenza di entalpia a monte e a valle dei letti adsorbenti, mentre il 66% è dovuto al raffreddamento attuato negli scambiatori evaporativi. Il valore medio giornaliero di EER è di 8,6 mentre la potenza media assorbita è di 90 W. I consumi di elettricità registrati per la movimentazione dell'aria e dell'acqua sono relativamente bassi così come previsto d'altra parte per questo tipo di unità. Si fa notare che l'energia elettrica consumata dall'unità non proviene dalla rete elettrica ma dal sistema di autoproduzione di energia da fotovoltaico.

Nella Figura 454 viene mostrata la distribuzione dell'energia elettrica consumata dai diversi dispositivi

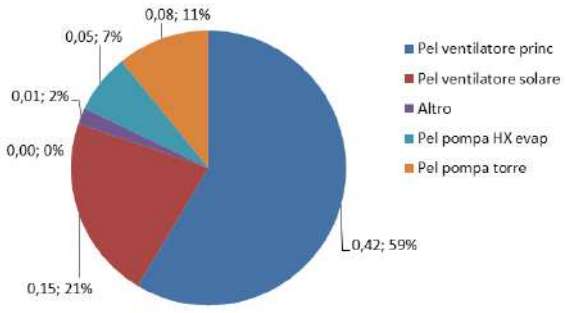


Figura 454. Distribuzione dei consumi elettrici in kWh

ausiliari. Come si può notare il consumo maggior è dovuto al ventilatore principale che è responsabile del 59% del consumo totale pari a 0,72 kWh.

FREESCOO Office

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando un locale di prova appositamente strumentato. Tale locale è servito dall'impianto AI.CO.WA. con pompa di calore a CO_2 e fan coil quali terminali d'impianto. L'impianto AI.CO.WA. ha lo scopo di mantenere la temperatura del locale a 26 °C mentre l'impianto FREESCOO realizza il ricambio d'aria dell'ufficio secondo la UNI 10339, immettendo in ambiente aria con determinate caratteristiche di temperatura, umidità e purezza (aria neutra).

L'impianto solar DEC realizza, attraverso l'utilizzo della radiazione solare e dell'acqua, la deumidificazione ed il ricambio dell'aria degli ambienti in accordo con gli obiettivi di risparmio energetico individuati dall'Unione Europea, di sviluppo sostenibile e di basso impatto ambientale. Tale sistema di solar DEC è un sistema reso completamente autonomo dalla rete elettrica mediante l'integrazione di un sistema fotovoltaico per la fornitura dell'energia elettrica necessaria al funzionamento dei componenti costituenti la macchina. Il sistema FREESCOO è dotato di due batterie per lo stoccaggio dell'energia elettrica prodotta dal collettore solare fotovoltaico.

FRESCOO office è stato progettato per essere compatto e svolgere funzioni di ventilazione, deumidificazione e raffreddamento (in seguito verrà studiato anche in funzione di riscaldamento invernale) utilizzando solamente il calore fornito dal sole. Il sistema è essenzialmente composto da un involucro in alluminio che comprende collettori solari di tipo termico e fotovoltaico, e diversi componenti che permettono il funzionamento della macchina:

- due letti adsorbimenti;
- una torre di raffreddamento integrata;
- due scambiatori di calore evaporativi a pacco;
- un ventilatore solare;
- un ventilatore principale;
- altri dispositivi ausiliari per il processo di trattamento dell'aria.

Il prototipo si basa su una particolare sequenza di trattamenti dell'aria tali da permettere il controllo della temperatura e dell'umidità dell'ambiente servito. Il funzionamento del sistema è basato sulle seguenti fasi (Figura 455).

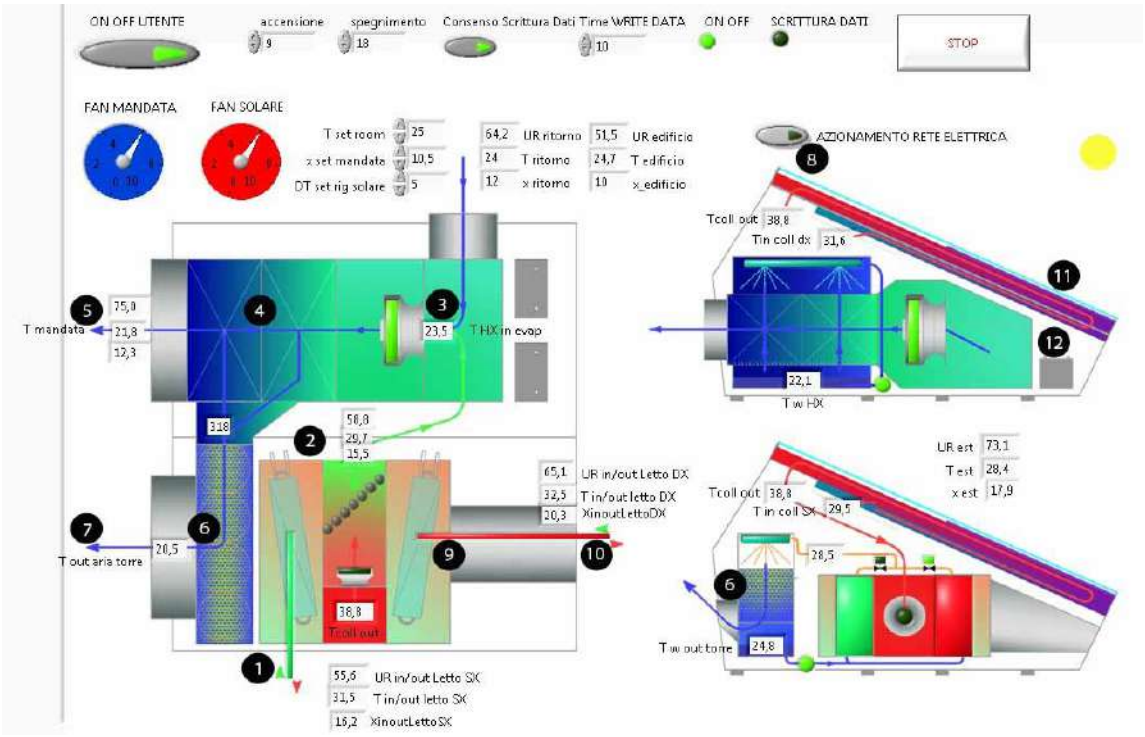


Figura 455. Distribuzione dei consumi elettrici in kWh

- una portata d'aria calda e umida, tipica di una giornata estiva, proveniente dall'ambiente esterno (1) attraversa un letto adsorbente riempito di silica gel che ne assorbe l'umidità rendendola molto secca (2). Grazie alla presenza di tubi alettati attraversati da acqua refrigerata proveniente dalla torre evaporativa, il flusso d'aria entrante subisce anche un primo leggero raffreddamento; l'aria deumidificata (2) viene miscelata con l'aria di ritorno dall'edificio (3). La temperatura e l'umidità della miscela d'aria ottenuta dipendono dalle caratteristiche dei due flussi;
- il ventilatore principale (3) spinge l'aria miscelata verso i due scambiatori evaporativi a pacco. L'aria miscelata (4), che ha una portata pari a circa il 140% della portata d'aria fornita all'edificio, viene divisa in due flussi: il flusso principale con una portata pari al 100% della portata d'aria fornita all'edificio entra negli scambiatori evaporativi subendo un raffreddamento per venire successivamente immesso nell'ambiente climatizzato; il flusso secondario con una portata pari al 40% della portata d'aria fornita all'edificio verrà utilizzato per raffreddare il flusso principale per effetto indiretto. Per produrre tale effetto di raffreddamento, il flusso d'aria secondario confluisce verso l'alto, dove investe l'acqua precedentemente nebulizzata tramite degli ugelli per ottenere l'effetto di evaporazione. Il flusso primario non entra in contatto diretto con l'aria del flusso secondario, ma cede il suo calore tramite contatto indiretto, senza quindi incrementare il suo contenuto di umidità. L'acqua viene successivamente raccolta in una bacinella posta sotto i due scambiatori, in modo che tramite una pompa di circolazione venga rimandata verso gli ugelli per essere nuovamente nebulizzata ed essere investita dall'aria. L'acqua viene fornita dalla rete per un consumo massimo pari a circa 15 l/h. La bacinella è collegata alla bacinella di raccolta dell'acqua nella torre evaporativa rendendo sufficiente un solo collegamento con la rete idraulica;
- l'aria raffreddata (4) viene così immessa nell'ambiente (5);
- parte della miscela che ha subito l'effetto di evaporazione negli scambiatori evaporativi (4) viene ceduta alla torre di raffreddamento integrata nel sistema (6). L'acqua così raffreddata sarà pronta per essere ricircolata verso gli ugelli. L'acqua invece proveniente dai tubi alettati presenti nei letti adsorbenti cede calore alla miscela nella torre evaporativa che poi viene espulsa (7);
- i collettori solari captano la radiazione solare (8) utilizzata per la produzione di aria calda che a sua volta viene usata per far evaporare l'umidità immagazzinata nei letti adsorbenti (rigenerazione). Come si vede dalla schermata acquisita da LABVIEW, la freccia rossa indica quale letto è in rigenerazione ed è investito dal flusso di aria calda proveniente dai collettori solari (9) che verrà espulso dopo aver contribuito ad essiccare il letto in silica gel (10). Per assicurare un funzionamento continuo del sistema sono presenti due letti essiccanti cosicché mentre uno lavora per deumidificare l'aria, l'altro è rigenerato utilizzando il calore proveniente dal campo solare. Dopo un certo tempo di funzionamento il sistema di controllo automatico invertirà il funzionamento dei due letti in modo tale da utilizzare il letto appena rigenerato per deumidificare l'aria, sottoponendo l'altro alla sua riattivazione. Il controllo automatico funziona tramite un rilevatore di umidità che verifica l'effettiva umidità dell'aria inviata in ambiente. Quando viene rilevato un calo dell'efficacia di deumidificazione del letto, il sistema di controllo fa sì che l'acqua, proveniente dalla torre evaporativa, inizi a circolare all'interno dell'altro letto in modo da abbassarne l'elevata temperatura raggiunta durante la fase di rigenerazione, per poi cambiare la posizione della valvola, invertendo così la direzione del flusso d'aria in entrata nei letti. Una volta invertito il flusso, il primo letto sarà sottoposto alla fase di rigenerazione tramite il flusso di aria calda proveniente dal solare termico;
- il pannello fotovoltaico cattura l'energia solare trasformandola in energia elettrica (11). Quest'energia è immagazzinata in due batterie che forniranno l'energia necessaria per il funzionamento delle pompe di circolazione, dei due ventilatori e degli ausiliari (12).

I punti di forza di tale nuovo sistema possono essere così sintetizzati:

- condizionamento degli spazi abitativi e/o lavorativi (raffreddamento, deumidificazione, ricambio dell'aria);
- sistema passivo che si traduce in efficienza energetica grazie al fotovoltaico che permette al sistema di essere quasi o totalmente autonomo dal sistema di rete elettrica;
- sostanziali risparmi sui costi energetici, anche grazie alla possibilità di accesso ad incentivi nazionali e comunitari in grado di ridurre l'investimento iniziale ed i tempi di rientro;
- rispetto dell'ambiente e utilizzo di fonti energetiche rinnovabili;
- assenza di gas nocivi per l'atmosfera, il refrigerante utilizzato è l'acqua.

Le applicazioni del sistema FREESCOO sono diverse: trattamento dell'aria, climatizzazione nel settore residenziale e quello del cosiddetto "commerciale leggero" (uffici, negozi, etc.). Grazie alla sua modularità, si possono raggiungere potenze di deumidificazione e raffreddamento elevate. Inoltre, grazie all'uso di pannelli fotovoltaici, si può ipotizzare un utilizzo anche in ambienti caratterizzata dall'assenza totale o parziale di energia elettrica, come bungalow o case mobili. Può essere configurato in modo da poter essere installato sia su tetto piano che su tetto a falda.

Il sistema FREESCOO office è stato impostato in modo da mantenere una portata di mandata fissata per tutto il periodo di funzionamento pari a circa 1000 m^3/h. L'obiettivo dei test sperimentali è la verifica delle prestazioni nel caso di funzionamento come unità per il trattamento dell'aria di rinnovo. Lo scopo principale del sistema è dunque la deumidificazione della portata d'aria che proviene dall'esterno. In realtà il sistema è in grado di attuare anche un parziale raffreddamento dell'aria di mandata contribuendo così all'abbattimento del carico sensibile. In Figura 456 vengono riportate le caratteristiche dei punti costituenti il ciclo di funzionamento della macchina ed il rispettivo diagramma psicometrico.

		Descrizione	x	T	h
			g/kg	°C	kJ/kg
Aria di processo	1	Aria esterna	17,3	31,5	75,9
	2	Letto adsorbente	13,0	31,2	64,6
	3	Miscelazione	10,6	27,2	54,5
	4	SC1 + SC22	10,6	22,4	49,5
Edificio	6	Aria di ritorno	9,8	25,8	50,9
Aria secondaria negli scambiatori di calore evaporativi	4	Prim. HX1+HX2	10,6	22,4	49,5
	5	Second. HX1+HX2	16,0	22,0	62,7
Torre di raffreddamento	5	Ingresso torre	16,0	22,0	62,7
	7	Uscita torre	19,0	24,5	73,0
Aria refrigerata	1	Aria esterna	17,3	31,5	75,9
	8	Collettore solare	17,3	50,5	95,6
	9	Desorbimento	22,2	38,0	95,2

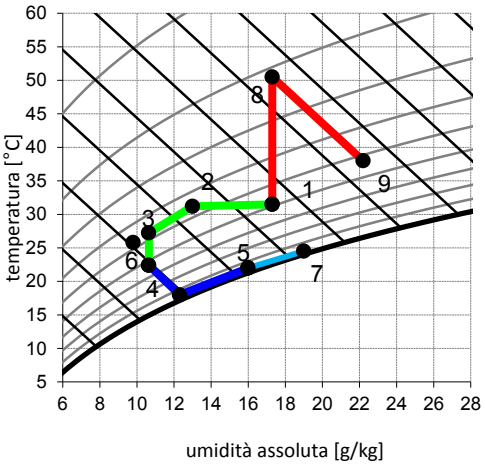


Figura 456. Punti del ciclo e diagramma psicometrico del ciclo considerato

Il grafico riportato in Figura 457 mostra i risultati in termini di deumidificazione prodotta dall'unità durante le ore di funzionamento (accensione ore 9:00, spegnimento ore 18:00) per una giornata TIPO esaminata (31/08/2014).

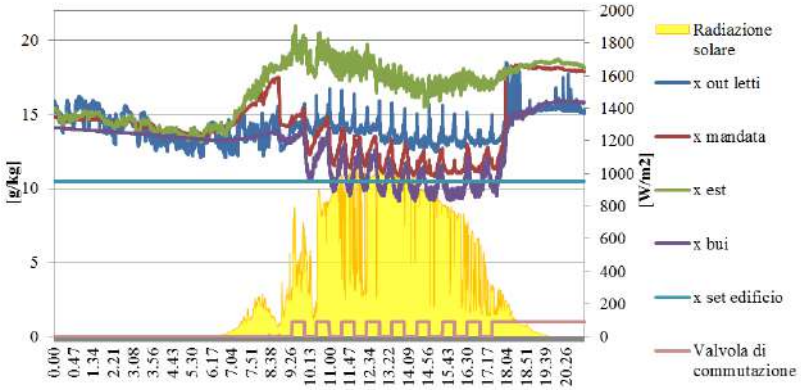


Figura 457. Valori di umidità assoluta dell'aria esterna (verde), dell'aria interna al locale (viola), dell'aria di mandata (rosso scuro) e dell'aria in uscita dai letti adsorbenti (azzurro), radiazione solare e posizione

Dal grafico si evince che la deumidificazione dell'aria esterna nell'attraversamento dei letti adsorbenti è dell'ordine di 4-5 g/kg. A causa dell'elevata umidità assoluta dell'aria esterna nella giornata considerata, il sistema non è però in grado di soddisfare interamente le esigenze di deumidificazione. Il carico latente restante in ambiente viene così abbattuto dal sistema a fancoil presente nel locale e collegato alla macchina di produzione del freddo a CO_2. La temperatura di mandata oscilla tra 22,5 e 25°C in relazione all'accensione o spegnimento del sistema a fan coil interno all'edificio (Figura 458). Ciò dimostra che il contributo al raffreddamento sensibile dell'edificio è modesto aggirandosi mediamente a circa 800 W.

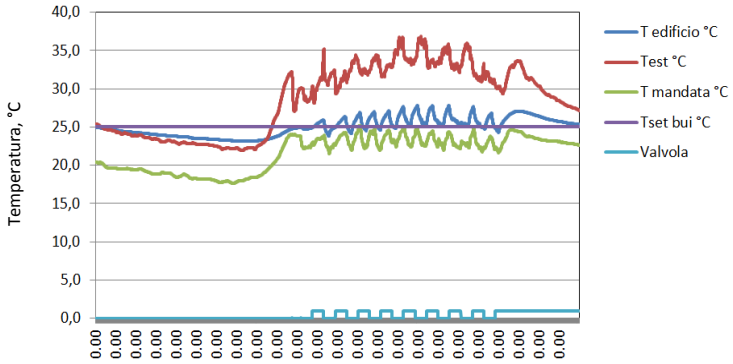


Figura 458. Andamento delle temperature dell'edificio, dell'aria esterna e di quella di mandata

Si noti come la temperatura dell'aria in uscita dai letti adsorbenti sia circa uguale a quella dell'aria in ingresso (Figura 459). Ciò è dovuto al raffreddamento dei letti adsorbenti per mezzo della torre di raffreddamento. Questo aspetto è molto importante considerando che nei sistemi DEC tradizionali le temperature in uscita dai rotori deumidificanti possono superare facilmente i 50 °C.

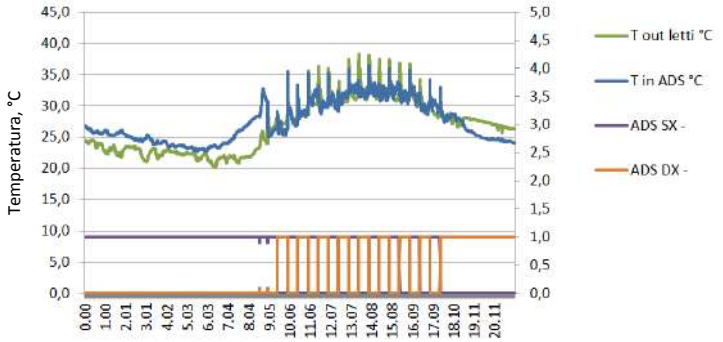


Figura 459. Andamento della temperatura di ingresso e uscita dai letti adsorbenti

La potenza elettrica del sistema è sempre inferiore a 250 W così come previsto dai dati forniti dalla Ditta costruttrice (Figura 461). I picchi inferiori sono relativi allo spegnimento del ventilatore solare che avviene poco prima che venga invertito il funzionamento dei letti. In corrispondenza di ogni scambio dei letti viene spenta inoltre la pompa della torre evaporativa per far sì che l'acqua presente nel letto che si trova alla fine della fase di adsorbimento possa fluire verso la vaschetta di raccolta della torre evitando così che si riscaldi con il calore proveniente dal collettore solare. Questo procedimento permette di preraffreddare il materiale adsorbente prima che questo venga utilizzato in modalità di deumidificazione.

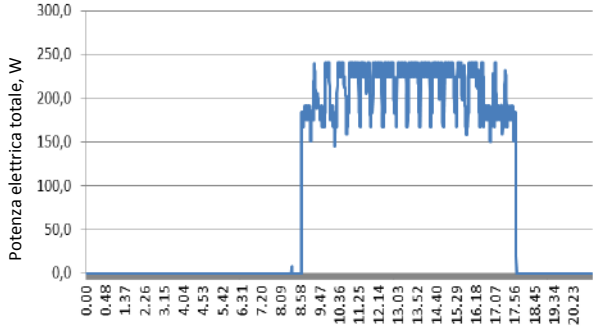


Figura 460. Potenza elettrica totale assorbita

In termini di EER (Energy Efficiency Ratio) il sistema presenta dei buoni valori. L'EER medio per la giornata considerata è infatti leggermente superiore a 9. Inoltre si ricorda che l'energia elettrica è fornita interamente dall'impianto fotovoltaico presente nell'unità (Figura 461). Per quanto riguarda invece la potenza frigorifera fornita, questa si attesta su valori inferiori rispetto a quelli attesi nelle condizioni di funzionamento esaminate. Ciò è dovuto al fatto che, come si è detto, il sistema di raffreddamento attuato negli scambiatori evaporativi ha

mostrato delle inefficienze dovute alla cattiva distribuzione dell'acqua e dell'aria all'interno dei canali secondari degli scambiatori.

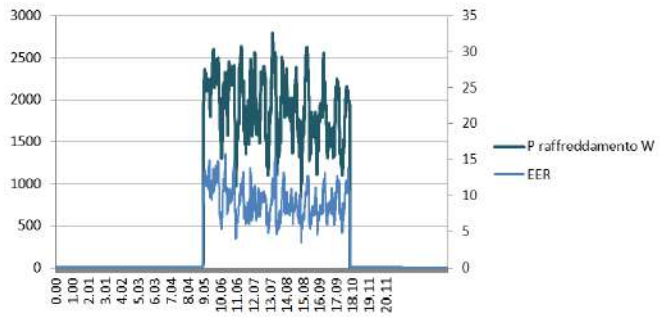


Figura 461. Potenza di raffreddamento e EER

Per quanto riguarda la distribuzione dei consumi elettrici il peso maggiore è dato dal ventilatore principale che in questo caso opera alla massima velocità per l'intero periodo di funzionamento (Figura 462). Il peso del circolatore dello scambiatore evaporativo è invece molto basso e pari a solo il 5% del totale. La logica di regolazione prevede infatti dei cicli di accensione e spegnimento che si ripetono ogni 5 minuti.

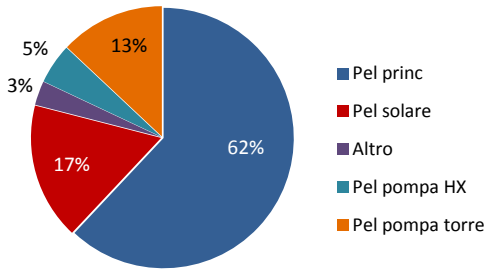


Figura 462. Distribuzione dei consumi di energia tra gli utilizzatori presenti nel sistema

Conclusioni

A livello internazionale il solar cooling è riconosciuto come una tra le tecnologie per la climatizzazione degli edifici più promettenti. D'altra parte, diversi studi hanno dimostrato la necessità di ulteriori sviluppi a livello tecnologico, di standardizzazione dei prodotti e di riduzione dei costi di installazione. In merito a questo, si sottolinea che la tecnologia del sistema FREESCOO è stata sviluppata nell'ottica del superamento delle barriere riscontate tradizionalmente nell'ambito dei sistemi di solari cooling, ponendo soprattutto attenzione ai seguenti aspetti:

- incremento dell'efficienza energetica, grazie all'impiego della innovativa tecnologia DEC a letti fissi raffreddati;
- minore complessità impiantistica a vantaggio di una riduzione dei costi di produzione e installazione del sistema;
- possibilità di funzionamento anche in modalità off grid.

I test funzionali eseguiti hanno permesso di verificare il funzionamento e l'idoneità del sistema per applicazioni nel settore terziario. I risultati ottenuti hanno mostrato che è possibile soddisfare le esigenze di ventilazione e trattamento dell'aria a costo energetico quasi nullo. In particolare si è riscontrato che la tecnologia a letti fissi raffreddati permette di garantire capacità di deumidificazione (e di conseguenza successivo raffreddamento negli scambiatori evaporativi) per diverse ore dopo il calare del sole. Inoltre con questa tecnologia è possibile controllare il processo di deumidificazione agendo sulla temperatura del letto. Il consumo di energia elettrica dei ventilatori è risultato molto limitato e praticamente corrispondente a quello preventivato.

E' stato infine dimostrato che le unità possono operare in modalità stand-alone per diversi giorni grazie al sistema fotovoltaico/batteria utilizzato.

Il coefficiente EER medio calcolato sulla base dell'energia elettrica prelevata dalla rete è maggiore di 30 dimostrando l'alto potenziale di risparmio rispetto ai sistemi di trattamento dell'aria di tipo tradizionale.

Durante le prove svolte sono state introdotte alcune migliorie nella logica di commutazione dei letti adsorbenti che hanno permesso di ridurre gli effetti negativi legati all'inerzia termica dei letti.

D'altra parte, nell'esame del comportamento del sistema, sono state riscontrate alcune inefficienze dovute ad un funzionamento non ottimale di alcuni dei componenti utilizzati. In particolare, le prestazioni misurate relative alla parte di raffreddamento evaporativo sono inferiori rispetto a quelle attese. Le principali cause di riduzione della prestazione possono essere essenzialmente imputate alla bassa bagnabilità dello stato di rivestimento anticorrosivo in resina epossidica delle superfici dei canali secondari degli scambiatori evaporativi, alla

distribuzione non omogenea delle velocità dell'aria nei canali secondari degli scambiatori evaporativi e dell'acqua spruzzata dagli ugelli.

Possibili soluzioni ai problemi accennati potrebbero prevedere l'utilizzo di un rivestimento idrofilo sulla superficie dei canali secondari, una riprogettazione del sistema di spruzza mento dell'acqua e una diversa geometria del canale di scarico dell'aria secondaria in uscita dagli scambiatori evaporativi.

Un ulteriore possibile ambito di miglioramento è relativo all'introduzione di un sistema di regolazione della portata d'aria che attraversa i letti adsorbenti. Nell'unità esaminata il rapporto tra l'aria che attraversa i letti adsorbenti e quella di ricircolo proveniente dall'ambiente è attualmente fisso. La possibilità di regolare la quantità d'aria che attraversa i letti adsorbenti garantirebbe un migliore controllo dell'umidità dell'aria inviata in ambiente.

I risultati sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2013/160 e RdS/PAR2013/161.

b. Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura

Obiettivo generale di questa linea di attività è l'analisi sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura da destinarsi ai settori della climatizzazione residenziale, commerciale e terziaria, alla produzione di freddo in ambito industriale ed alla produzione di calore per alimentare processi co-generativi ad uso industriale.

b.1. Ricerca e sperimentazione su concentratori solari termici per applicazioni a media temperatura

Scopo della presente task è la sperimentazione e qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura destinati sia alla climatizzazione degli ambienti in ambito residenziale, commerciale e terziario, sia alla produzione di freddo in ambito industriale.

Modellazione ottica e termo-fluidodinamica su diverse tipologie di concentratori per l'analisi e la previsione delle loro prestazione energetiche

L'attività ha avuto come obiettivo la messa a punto di una metodica per la determinazione teorica della curva di efficienza di concentratori parabolici lineari e concentratori a specchi di Fresnel operanti a media temperatura. Tale attività è complementare alla determinazione sperimentale della curva di efficienza mediante il circuito di prova ad olio diatermico realizzato nelle precedenti annualità.

In generale, il solo approccio sperimentale considera il collettore come una scatola nera per cui non è possibile dedurre dai soli dati sperimentali informazioni importanti riguardanti il campo termico e fluidodinamico dei vari componenti il ricevitore (vetro, intercapedine, tubo assorbitore, fluido-termovettore). In riferimento ad esempio al fluido-termovettore, specie nel caso in cui esso sia olio diatermico, che è caratterizzato da elevati valori della viscosità, è importante avere informazioni dettagliate sulla distribuzione delle temperature e del campo di velocità nel sotto-strato laminare a ridosso della parete interna del ricevitore. Gradienti elevati di velocità e temperatura a ridosso della parete sono indice di uno scambio termico non soddisfacente e l'analisi teorica permette di determinare l'incremento di portata necessario per quantificare l'incremento di efficienza ottenibile con il relativo aumento del livello di turbolenza. Una tale analisi di sensibilità una volta impostato il modello del ricevitore è di semplice attuazione e permette di determinare la variazione conseguente dei parametri della curva di efficienza per vari valori di portata laddove l'approccio sperimentale relativo a tale problema richiede di ripetere ex-novo le misure necessarie per la determinazione dei parametri della curva di efficienza nelle condizioni variate. Sempre in riferimento alle problematiche di scambio termico risulta possibile, una volta messo a punto un modello del ricevitore, individuare i valori effettivi della emissività del coating selettivo in funzione della temperatura di funzionamento introducendo nel modello valori tali da minimizzare lo scarto tra i parametri della curva di efficienza determinata per via sperimentale e quelli dedotti per via teorica. Il modello teorico è utilizzabile anche per verificare le imperfezioni eventuali dell'ottica di concentrazione paragonando tra loro i valori dell'intercetta della curva di efficienza ottenuta per via sperimentale con quelli ottenuti per via teorica.

D'altra parte la determinazione per via teorica della curva di efficienza richiede di mettere a punto modelli del ricevitore basati ad esempio sul metodo degli elementi finiti o dei volumi finti che da una parte devono riprodurre con una buona accuratezza il fenomeno reale e dall'altra devono essere caratterizzati da tempi di calcolo e risorse di memoria ragionevoli. A tal fine nell'ambito dell'attività sono stati realizzati modelli semplificati bidimensionali che poi sono stati validati per confronto con modelli più generali 3D. Infine è da considerare il fatto che i metodi di calcolo utilizzati richiedono una analisi critica della grande mole di risultati ottenibili e da questo punto di vista l'individuazione della discretizzazione spaziale dei domini di calcolo tale da fornire una replica accurata del

fenomeno reale richiede un numero elevato di simulazioni da raffrontare in modo da ottenere risultati attendibili con tempi di calcolo e risorse di memoria ragionevoli.

In prima analisi la modellazione termo-fluidodinamica è stata sviluppata per un concentratore parabolico lineare dotato di un ricevitore tubolare non evacuato. Il sistema è caratterizzato 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 avente determinate caratteristiche ottiche, a sua volta incapsulato in un tubo di vetro all'interno del quale è presente aria a pressione atmosferica. In Figura 463 è riportata sia la vista assonometrica di una porzione del concentratore sia la vista in sezione del ricevitore.

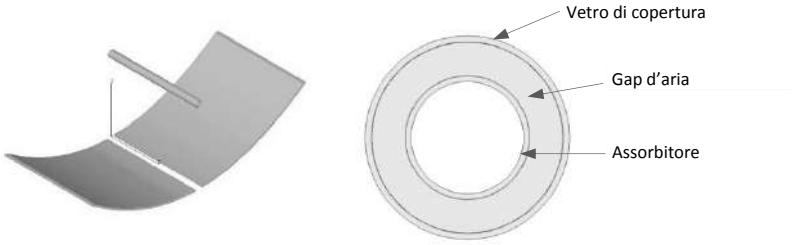


Figura 463. Vista assonometrica di una porzione del concentratore parabolico lineare e dettaglio del ricevitore visto in sezione

Per il modulo in esame, utilizzando il circuito ad olio diatermico presente nel laboratorio è stata determinata sperimentalmente la curva di efficienza in stato stazionario, utilizzando il metodo riportato nello standard EN 12975.

L'attività che qui si sintetizza rappresenta uno sviluppo ed un completamento delle attività iniziate nella scorsa annualità ed ha come obiettivo la messa a punto di una metodica per la determinazione teorica della curva di efficienza di concentratori parabolici lineari e/o concentratori a specchi di Fresnel operanti a media temperatura. Tale metodica si basa su analisi approfondite della termo-fluidodinamica dei ricevitori utilizzando software basati sul metodo degli elementi finiti (Comsol) e sul metodo dei volumi finiti (Fluent). I risultati di tali analisi sono stati utilizzati per determinare, mediante script di MATLAB, il flusso termico tra parete interna del tubo ricevitore e fluido termovettore, noto il quale si hanno tutti i parametri necessari per la valutazione teorica della curva di efficienza.

Come punto di partenza di tale attività si è dapprima realizzata una analisi esaustiva della letteratura sull'argomento; da tale analisi si è visto che le ricerche e gli studi del settore riguardano nella maggior parte dei casi concentratori ad alta temperatura mentre non sono disponibili studi sui concentratori a media temperatura. Tali lavori si riferiscono a collettori parabolici lineari funzionanti a temperature superiori a 35 0°C con intercapedine tra ricevitore e tubo in vetro in cui è praticato il vuoto anche se alcuni di essi effettuano anche il calcolo in condizioni di perdita del vuoto.

Il collettore analizzato nel presente lavoro è indicato per un funzionamento a temperature tra i 100 e i 250°C e quindi, come si è rilevato dalle simulazioni, con intensità di turbolenza dell'olio diatermico inferiore rispetto ai ricevitori ad alta temperatura; in esso inoltre per scelta del costruttore non è praticato il vuoto nell'intercapedine. La maggior parte dei lavori reperiti in letteratura utilizzano per la simulazione termo-fluidodinamica il codice FLUENT e modellano la turbolenza mediante il modello standard k-epsilon, che richiede l'utilizzo delle funzioni di parete per estendere il calcolo allo strato a ridosso delle pareti del tubo dove gli sforzi viscosi predominano rispetto a quelli turbolenti ed esso, a rigore, è valido per moto turbolento completamente sviluppato. Nel presente lavoro le analisi sono state svolte utilizzando come modello di turbolenza sia il modello k–epsilon classico sia una sua derivazione nota in letteratura come modello "Low Reynolds k-epsilon" le cui equazioni rimangono valide anche negli strati laminari a ridosso della parete e nelle eventuali zone del tubo in regime di transizione senza la necessità dell'uso delle funzioni di parete; zone queste in cui il numero di Reynolds è basso, da ciò il nome di Low-Reynolds con cui il modello è conosciuto.

Il primo modello utilizzato nell'analisi qui esposta è bidimensionale e riferito ad una sezione del tubo ortogonale al suo asse. Ciò permette di introdurre nel modello la disuniformità del flusso radiante. Occorre naturalmente effettuare il calcolo con una temperatura dell'olio diatermico imposta. Dal calcolo comunque si ricava il flusso termico per unità di lunghezza in funzione di una data temperatura del fluido per cui è immediato, una volta che si sia diviso il tubo in tratti di lunghezza prefissata, determinare l'incremento di temperatura lungo l'asse.

Accanto a tale modello ne è stato sviluppato un secondo che tiene conto della simmetria assiale del tubo ricevitore effettuando in questo caso il calcolo con flusso radiante uniforme e applicando i modelli di turbolenza k–epsilon e "Low Reynolds k-epsilon" all'olio diatermico. Infine si sono effettuate simulazioni su un modello 3D del tubo ricevitore con lo scopo di verificare che i modelli più semplici sopra descritti corrispondessero comunque ad analisi sufficientemente accurate. Nel modello bidimensionale piano il fluido termovettore è esterno al dominio di calcolo ed è semplicemente descritto da un coefficiente di scambio termico funzione dei numeri di Reynolds e Prandlt e del fattore di attrito di Darcy. Il modello è assai semplice ma necessita per essere validato di analisi più complesse che tengano conto direttamente del regime fluidodinamico dell'olio diatermico.

Il secondo modello utilizzato si basa sulla constatazione che la forma geometrica del ricevitore è assial-simmetrica rispetto all'asse z del tubo e si è proceduto assumendo assial-simmetrico anche il flusso dell'olio diatermico. Ciò non è verificato nella realtà in quanto la potenza radiante incidente sul tubo ricevitore non è uniforme e non è neppure assial-simmetrica la forza di gravità. Supponendo tuttavia che gli effetti della gravità sul moto dell'olio diatermico e di quello dell'aria nell'intercapedine siano trascurabili dato il piccolo sviluppo del tubo in verticale e che gli effetti sulla temperatura media di massa T_f della potenza radiante incidente sul tubo ricevitore siano grosso modo gli stessi se si sostituisce la distribuzione effettiva di flusso radiante con una distribuzione uniforme in modo che in entrambi i casi il flusso radiante totale sia lo stesso, l'analisi può essere condotta ed ha senso. Si è quindi scelto un sistema di assi con l'asse z coincidente con l'asse del tubo e l'asse r ad esso ortogonale (per l'assunta simmetria assiale non interviene l'ascissa angolare θ in quanto le grandezze che caratterizzano il moto e lo scambio termico sono le stesse qualunque sia il piano meridiano considerato). In Figura 464 sono rappresentati il campo termico della sezione di uscita del tubo per una temperatura in ingresso dell'olio diatermico di 250°C ed il campo di velocità nell'olio sempre nella sezione di uscita.

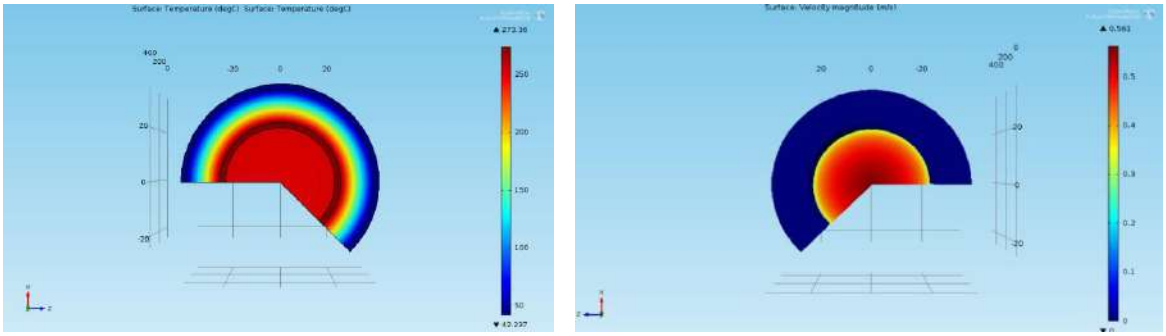


Figura 464. Campo termico della sezione di uscita del tubo e campo delle velocità dell'olio nella stessa sezione (simulazione assial-simmetrica)

Si fa notare che in questo modello l'olio diatermico fa parte del dominio di calcolo ed essendo il moto turbolento, nell'applicare il metodo degli elementi finiti e quello dei volumi finiti, occorre ricorrere a un modello matematico del moto turbolento. Nel nostro caso si sono utilizzati sia il modello standard k-ε, sia il modello "Low Reynolds k-ε". Da notare che le prove sperimentali sul concentratore sono state svolte con una portata per cui il numero di Reynolds a 100°C (temperatura minima di lavoro) è intorno a 4300 e quindi il moto è in regime di transizione. Risulta quindi assai interessante vedere come i tre modelli di calcolo utilizzati risolvano il campo termico e di moto in tale situazione particolare. Le simulazioni sono state effettuate facendo riferimento a una porzione di tubo della lunghezza di un metro con condizioni al contorno tali da simulare la condizione di lontananza dalle sezioni di ingresso ed uscita del ricevitore.

Il fine delle simulazioni è stato quello di determinare il flusso termico per unità di lunghezza del tubo (in funzione della sua temperatura e per valori fissati di radianza, portata e temperatura ambiente) da utilizzare in uno specifico script di MATLAB per la determinazione della curva di efficienza. I risultati ottenuti sono rappresentati nel grafico in Figura 466.

I risultati delle simulazioni (di cui i grafici mostrati ne sono un esempio) sono il risultato finale di oltre un centinaio di simulazioni effettuate con un numero elevato di combinazioni di mesh sia strutturate che non strutturate a diverso infittimento per i vari domini di calcolo (olio diatermico, tubo in acciaio, intercapedine, vetro) e per ogni dominio di calcolo diverse da zona a zona, partendo da mesh rade ed infittendole gradualmente. In particolare si è effettuato un gran numero di simulazioni con diversi infittimenti della griglia di calcolo più accentuati soprattutto nello strato limite a ridosso della parete interna del tubo in quanto la determinazione accurata dello scambio termico tra parete interna del ricevitore e fluido termovettore ha richiesto particolare cura rispetto agli altri domini di calcolo meno critici. Inoltre l'analisi è stata svolta per diverse lunghezze del tubo ricevitore in modo da

verificare che i risultati ottenuti fossero indipendenti dalla lunghezza del tubo oggetto del calcolo e con diversi valori della intensità della turbolenza e della temperatura nella sezione di ingresso. Data la complessità computazionale richiesta, parte dei calcoli sono stati svolti utilizzando anche la piattaforma ENEA-CRESCO per il calcolo parallelo.

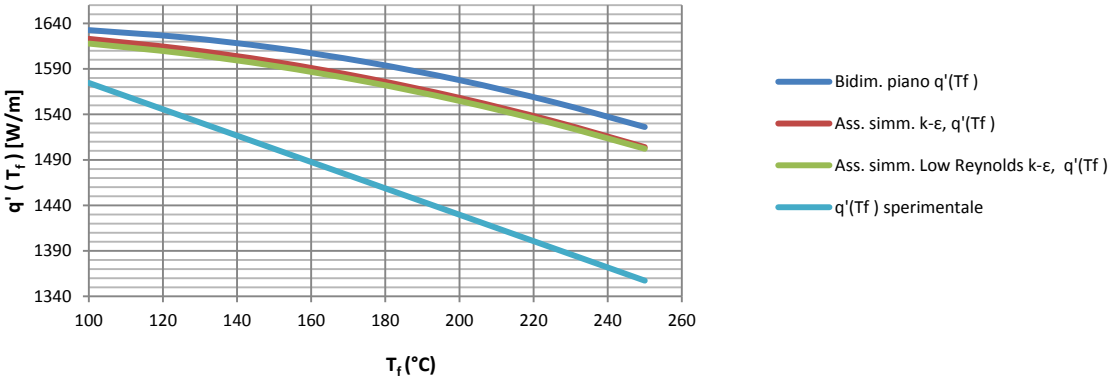


Figura 465. Flusso termico lineare secondo i vari modelli di turbolenza utilizzati e confronto con i dati sperimentali

I dati termo fluido dinamici ottenuti sono stati elaborati dallo script di MATLAB in modo da ricavare la curva di efficienza del concentratore secondo i vari modelli. I relativi risultati sono riportati nel grafico di Figura 466.

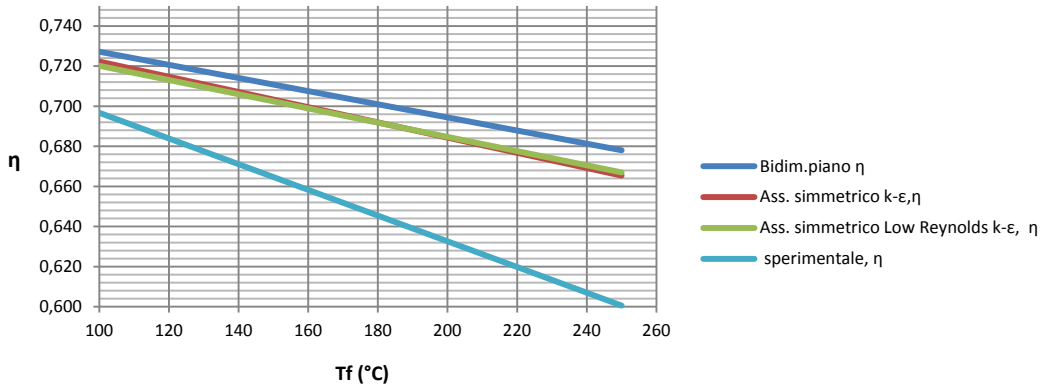


Figura 466. Curve di efficienza secondo i vari modelli di turbolenza utilizzati e confronto con i dati sperimentali

Infine i dati termo-fluidodinamici ottenuti con i modelli semplificati sopra descritti sono stati confrontati con un modello 3D dell'intero tubo ricevitore, nel quale: si è tenuto conto degli effetti della forza di gravità, non è stato necessario fare alcuna ipotesi di simmetria e si è considerata la disuniformità del flusso radiante sulla parete esterna del tubo ricevitore. Le Figure 467 e 468 mostrano alcuni dei risultati ottenuti.

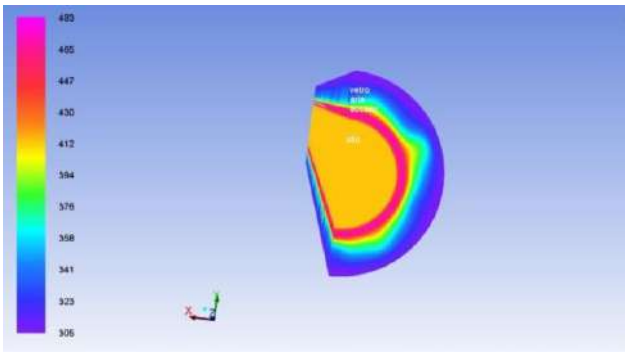


Figura 467. Campo termico in una porzione di tubo (simulazione 3D)

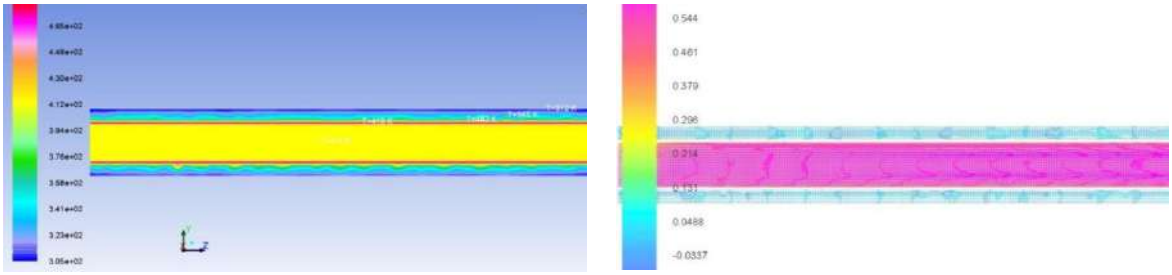


Figura 468. Campo termico e delle velocità in una sezione verticale del tubo (simulazione 3D)

Per concludere è stata messa a punto una procedura di calcolo basata sul metodo degli elementi finiti e dei volumi finiti che permette la determinazione teorica della curva di efficienza per collettori parabolici lineari operanti a media temperatura (da 100 a 250 °C) e che può essere estesa con poche differenziazioni ai collettori a specchi lineari di Fresnel. Per tutti i modelli teorici (bidimensionale piano, assial-simmetrico e 3D) lo scarto rispetto ai dati sperimentali aumenta all'aumentare della temperatura. Facendo il raffronto tra dati sperimentali e dati dedotti dal modello "Low Reynolds" che, dei modelli teorici fornisce le stime più basse, si trova uno scarto con i dati sperimentali di 43 W/m a 100 °C; lo scarto poi aumenta all'aumentare della temperatura fino al valore di 145 W/m che percentualmente è intorno al 11%. La risposta al perché di tali discrepanze rilevate tra previsioni teoriche e dati sperimentali non è agevole. Un motivo potrebbe risiedere nel fatto che, in mancanza di dati specifici per l'emissività del tubo, nei calcoli si è utilizzato un valore medio tra 100 e 250°C, pari al valore nominale dichiarato dal costruttore. Tenuto conto che il tubo è a contatto con aria, non si può escludere che la vernice selettiva si possa essere parzialmente ossidata e che quindi il valore di emissività effettiva sia notevolmente superiore a quello utilizzato nei calcoli; cosa che ovviamente comporta un aumento delle perdite e contemporaneamente una diminuzione del flusso termico lineare al crescere della temperatura di funzionamento del ricevitore. Attualmente sono in corso determinazioni sperimentali dell'emissività in funzione della temperatura del coating selettivo per la verifica di tale ipotesi.

Sviluppo di metodiche di prova specifiche per concentratori a media temperatura e relativa sperimentazione in campo

I collettori a concentrazione a media temperatura del tipo parabolico–lineare o a specchi lineari di Fresnel possono essere testati, in vista della determinazione sperimentale della curva di efficienza, secondo i dettami della norma EN-12975. Sebbene le metodiche contenute nel suddetto standard non si adattino perfettamente alle particolari caratteristiche dei collettori a concentrazione, il predetto standard richiede condizioni stazionarie delle varie grandezze da cui la curva di efficienza dipende (temperatura, portata, radiazione solare diretta), per assicurare le quali è necessario disporre di un circuito termoidraulico progettato tra l'altro per garantire la stazionarietà della temperatura in ingresso e della portata per ciascun punto di misura attraverso l'apporto e la sottrazione controllata di energia termica al concentratore in prova. Data l'ampia gamma di tipologie e taglie impiantistiche esistenti, il ricorso a circuiti di prova su scala laboratorio limita l'attività di caratterizzazione a componenti di taglia medio-piccola (poche decine di kW corrispondenti a superfici di captazione dell'ordine di alcune decine di m²). D'altra parte però, le applicazioni civili ed industriali in cui tali concentratori sono utilizzati, richiedono taglie impiantistiche ben più grandi che utilizzano moduli, le cui dimensioni sono dell'ordine di alcune centinaia di m², per i quali non si dispone di adatti circuiti di prova che peraltro dovrebbero essere caratterizzati da potenze in riscaldamento e raffreddamento molto elevate e quindi dai costi esorbitanti. L'unica via percorribile è quindi quella di effettuare in campo le misure delle diverse grandezze termo-fluidodinamiche e meteo-climatiche e da esse stimare i parametri della curva di efficienza caratteristici del concentratore in esame. D'altra parte il funzionamento in campo del concentratore da testare non è quasi mai in regime stazionario e ciò impone la necessità di definire una metodica di prova che permetta di determinare i parametri della curva di efficienza tenendo conto del fenomeno di accumulo di energia termica nel collettore da stimarsi necessariamente con un opportuno algoritmo di calcolo applicato alle misure effettuate in campo.

Di seguito è riportato nelle sue linee generali l'approccio metodologico adottato per la determinazione in campo delle prestazioni energetiche di concentratori solari in condizioni operative di non stazionarietà.

In generale il bilancio termico in transitorio di un collettore può essere scritto come segue:

$$C_{eff}\frac{dT_{m,eff}}{dt} = -Q_u + Q_{sol}$$

dove il primo termine indica il termine di accumulo sempre presente in misura più o meno rilevante nel funzionamento reale. Tale termine, a dispetto dell'apparente semplicità dell'equazione introdotta, non è semplice da quantificarsi in quanto al fenomeno in transitorio partecipano masse diverse (olio, tubo in acciaio, vetro) con diverse costanti di tempo e andamenti diversi delle temperature per cui, per ridurre il tutto ad un'unica capacità effettiva (C_{eff}) e ad un'unica temperatura media efficace ($T_{m,eff}$) è necessario ricorrere ad una procedura di calcolo oltremodo complessa. Tale procedura richiede un'analisi basata su un modello multi-nodale del ricevitore in cui ad ogni nodo si applica l'equazione in transitorio di cui sopra. La capacità effettiva (C_{eff}) Viene quindi determinata ricavando da tale modello l'energia accumulata e la derivata della temperatura media riferita all'intero tubo ricevitore, noti i cui valori si applica il metodo dei minimi quadrati all'espressione riportata sotto:

$$Q_{acc} \sim C_{eff}\frac{dT_{m,eff}}{dt}$$

È opportuno evidenziare che la C_{eff} così calcolata è in generale diversa da quella ottenibile mediante le proprietà fisiche dei materiali che costituiscono il ricevitore.

Relativamente ai termini Q_u e Q_{sol} questi sono dati da:

$$Q_u = \Gamma c_p(T_u - T_i)$$

$$Q_{sol} = A\ G\ K_{IAM}\ \eta_0 - AU_c(T_{m,eff} - T_{amb})$$

dove il calore utile (Q_u) è direttamente misurabile mentre non lo è l'apporto solare effettivo (Q_{sol}) in quanto esso dipende sia dalla temperatura media efficace ($T_{m,eff}$), che a sua volta dipende dal particolare transitorio in esame, sia dai valori di η_0 e U_c a priori non noti ma che il metodo qui introdotto consente di stimare.

D'altra parte l'efficienza reale del collettore nel funzionamento in transitorio è data dal rapporto tra l'apporto solare Q_{sol} (non misurabile direttamente) e la radianza complessivamente incidente e quindi si ha:

$$\eta_{reale} = \frac{Q_{sol}}{AG} = \frac{Q_u + C_{eff}\frac{dT_{m,eff}}{dt}}{AG}$$

valore diverso da quello riferito al solo calore estratto dal fluido termo-vettore (unico valore misurabile), la cui espressione è data da:

$$\eta_{mis} = \frac{Q_u}{AG}$$

La differenza tra i due valori è data dal fatto che in transitorio il termine di accumulo:

$$Q_{acc} = C_{eff}\frac{dT_{m,eff}}{dt}$$

non è nullo, e può assumere valori anche considerevoli. Ne consegue che per valutare l'influenza degli effetti capacitivi sulla stima dell'efficienza termica di un collettore è necessario stimare Q_{acc}.

Allo scopo è stato realizzato un modello in transitorio semplificato del collettore che, suddividendo il tubo ricevitore in un numero di nodi molto elevato, permette di risolvere il sistema di equazioni differenziali per ciascun nodo, dati che siano l'andamento della temperatura e della portata in ingresso al primo nodo, nonché la radianza e la temperatura ambiente.

Il modello così costituito è stato utilizzato per due finalità:

1. determinare l'influenza degli effetti capacitivi sulla misura dell'efficienza istantanea in presenza di disturbi sulla stabilità dei parametri in ingresso (temperatura, portata, condizioni meteo) dovuti a fenomeni di varia natura quali ed esempio: variazioni del carico, pendolamenti del sistema di controllo, ecc.
2. valutare il termine capacitivo che occorre introdurre per correggere il dato misurato e ricondurlo a valori più prossimi al valore vero. Tale approccio ha consentito di definire una metodica di prova che consente di stimare i parametri della curva di efficienza a partire da misure effettuate in condizioni forzatamente transitorie.

In entrambi i casi, il modello sviluppato fornisce in output l'andamento temporale delle temperature di ciascun nodo e ciò è sufficiente per determinare l'andamento nel tempo del termine Q_{acc} con buona accuratezza.

CASO 1 – Stima degli effetti capacitivi in condizioni non perfettamente stazionarie

Allo scopo di determinare l'influenza degli effetti capacitivi in condizioni perturbate rispetto ad una condizione di equilibrio, si è determinata dapprima la condizione di equilibrio corrispondente a valori costanti di radianza, temperatura ambiente, portata e temperatura in ingresso. A partire da tale stato di equilibrio si sono considerate (per semplicità) delle perturbazioni periodiche composte da sinusoidi di diverso periodo e diversa ampiezza e si è effettuato il calcolo in tali condizioni simulando anche il processo di misura con un periodo di campionamento di 5 secondi, mentre il passo temporale adottato per la soluzione del sistema di equazioni differenziali è stato di 0.1 secondi.

La Figura 469 riportata gli andamenti della temperatura di uscita T_u e di ingresso T_i, da cui si nota lo sfasamento delle due grandezze.

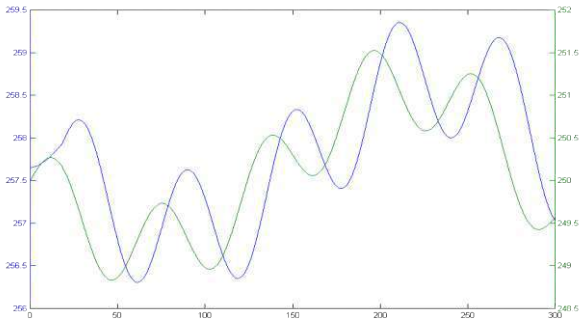


Figura 469.Temperatura di uscita (blu) e di ingresso (verde) in funzione del tempo in secondi

Come già anticipato prima, per passare dal modello a molti nodi al modello a singolo nodo, con il primo si è calcolato il $Q_{accumulo}$ e la derivata della temperatura media aritmetica tra ingresso e uscita dT_m/dt , e imponendo la condizione:

$$Q_{accumulo} \approx C_{eff} \frac{dT_m}{dt}$$

Con il metodo dei minimi quadrati si è trovata la C_{eff} che per il particolare transitorio in esame è risultata all'incirca del 21% più elevata rispetto a quella calcolabile per unico nodo in base alla densità e al calore specifico dell'olio diatermico e del tubo in acciaio.

Passando ai valori stimati dell'efficienza istantanea, il grafico in Figura 470 mette a confronto l'efficienza valutata tenendo conto dell'effetto capacitivo, e quella ottenuta attraverso le misure della sola Q_{utile}.

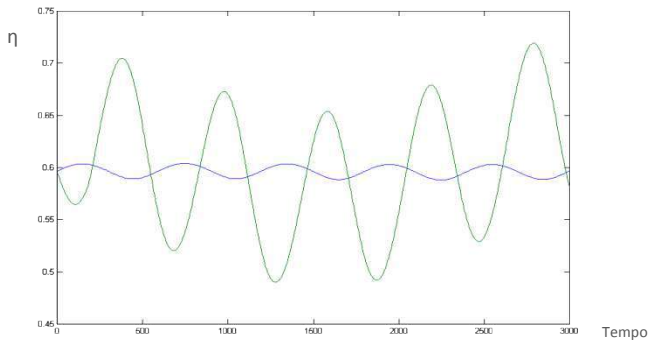


Figura 470. Andamento dell'efficienza considerando senza considerare l'effetto capacitivo (verde) e considerando l'effetto capacitivo (blu)

Dall'esame della curva si vede che l'efficienza istantanea effettiva, pur oscillando nel periodo di misura per effetto del fatto che accanto alle perturbazioni della temperatura in ingresso sono state considerate anche perturbazioni lente della portata e della radianza, l'ampiezza dell'oscillazione è risultata essere molto limitata. Un andamento completamente diverso è quello esibito dalla curva che rappresenta la misura sperimentale dell'efficienza: in questo caso si notano forti oscillazioni (da 0,5 a 0,7) che vengono compensate effettuando la media su periodi di misura sufficientemente lunghi. Ciò è giustificato dal fatto che il transitorio parte da una situazione di equilibrio e

le perturbazioni hanno oscillazioni sia positive che negative che tendono a compensarsi nelle medie. Se si fosse considerata una perturbazione monotona crescente o decrescente e si fosse partiti da stati lontani dall'equilibrio, anche le due medie avrebbero esibito scarti notevoli come in effetti verrà illustrato in seguito.

A riprova di quanto detto è utile riportare l'andamento nel tempo del rapporto percentuale tra la Q di accumulo e la Q utile, dalla quale si rilevano picchi massimi dell'ordine del 20%, come evidenziato nel grafico in Figura 471.

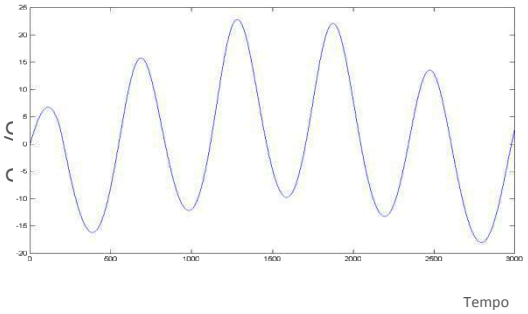


Figura 471. Q_{acc}/Q_u in funzione del tempo

CASO 2 – Stima degli effetti capacitivi in condizioni fortemente transitorie

Relativamente alla stima degli effetti capacitivi in condizioni fortemente transitorie, si sono considerate variazioni lineari crescenti della temperatura di ingresso con ritmi di crescita via via più elevati. Dato che il regime che si instaura in tali condizioni è fortemente non stazionario, è stato possibile evidenziare come i valori della potenza termica accumulata siano, nelle casistiche esaminate, dello stesso ordine di grandezxza di quelli della potenza utile estratta, per cui l'efficienza ottenuta senza tenere conto dell'effetto di accumulo risulta assai sottostimata rispetto all'efficienza reale. Le Figura 472 e 473 evidenziano quanto detto per alcune delle simulazioni effettuate a partire sia da dati misurati in campo si da dati ottenuti atrraverso considerazioni teoriche.

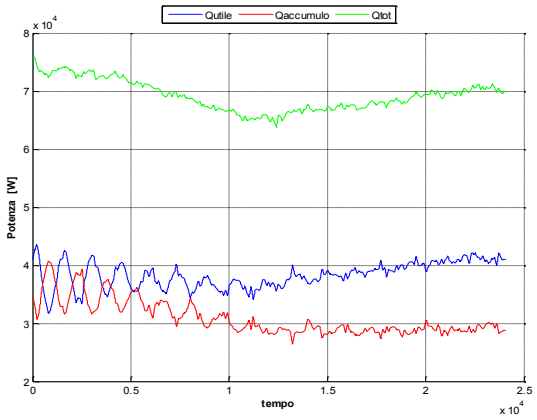


Figura 472. Andamenti nel tempo di Q_{acc}, Q_u e Q_{tot} in presenza di una rampa lineare di temperatura in ingresso (esempio di output per una delle tipologie linear-Fresnel esaminate)

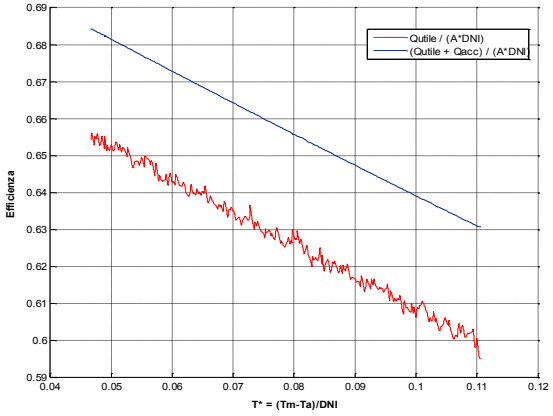


Figura 473.Confronto tra efficienza misurata ed efficienza corretta con gli effetti di accumulo (esempio di valutazione su un collettore parabolico lineare)

Tale approccio ha consentito di definire una metodica di prova che può essere utilizzata per stimare i parametri della curva di efficienza a partire da misure effettuate in condizioni forzatamente transitorie. Il tipo di transitorio

scelto è costituito da una rampa di temperatura che consente di effettuare misure sull'intero arco di funzionamento effettivo del collettore, situazione che rende più facile e più aderenti alla realtà la identificazione dei parametri della curva di efficienza. La metodica si basa sulla stima della Q di accumulo mediante il modello a molti nodi descritto in precedenza e nell'introduzione di tale termine nella valutazione dell'efficienza sommandolo al Q utile ottenuto dalle misure sperimentali.

Sperimentazione in campo dei modelli sviluppati

La suddetta metodica è stata sperimentata in campo durante alcune campagne di misura condotte presso dei siti di installazione di impianti solari a concentrazione oggetto di verifica da parte del Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia.

Le foto in figura 474 e 475 mostrano le installazioni su cui sono state condotte alcune prove finalizzate alla messa a punto e successiva validazione del metodo sviluppato.



Figura 474. Installazione su sui cui sono state eseguite le sperimentazioni in campo e relativo dettaglio dell'apparecchiatura utilizzata per il monitoraggio della radiazione solare



Figura 475. Seconda installazione su sui cui sono state eseguite le sperimentazioni in campo

Per concludere, nell'ambito della presente attività è stata messa a punto una metodica di prova che consente di stimare i parametri della curva di efficienza, caratteristici di collettori a concentrazione, a partire da misure in campo effettuate in condizioni dinamiche. Tale esigenza è stata motivata dalla necessità di poter caratterizzare dal punto di vista energetico questa tipologia di collettori nelle condizioni operative effettive. Alla base di tale metodo vi è la realizzazione di un modello in transitorio del collettore (applicabile a diverse tipologie di concentratori a media temperatura), in base al quale è possibile stimare il termine di accumulo (non misurabile direttamente) che è sempre presente nel funzionamento non stazionario e che può assumere valori anche considerevoli, tanto da determinare, se trascurato, una sottostima rilevante dell'efficienza del concentratore. Tale metodica è stata validata con successo attraverso una serie di verifiche sperimentali effettuate su più impianti caratterizzati da taglie e caratteristiche operative diverse.

I risultati dell'attività sono documentati e dettagliati nel rapporto RdS/PAR2013/162.

b.2 Sviluppo, caratterizzazione e sperimentazione di concentratori solari modulari compatti accoppiati a ricevitori basati sulla tecnologia dei mini e micro-canali

Scopo della presente task è lo sviluppo, caratterizzazione e sperimentazione di concentratori solari che utilizzino ottiche di piccole dimensioni accoppiati a ricevitori (eventualmente integrati nell'ottica di concentrazione) basati sulla tecnologia dei mini e micro-canali. Per il raggiungimento di tale obiettivo sono state condotte sia attività di indagine sulla termo-fluidodinamica di ricevitori a mini e micro-canali al fine di valutarne l'incremento delle performance termiche rispetto a ricevitori tradizionali, sia attività di sviluppo e sperimentazione di ricevitori piani a mini e micro-canali.

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, che ha curato lo studio teorico-sperimentale su ricevitori piani a mini/micro-canali per sistemi solari a concentrazione in applicazioni di solar-cooling ad alta efficienza.

Valutazione della produzione di vapore tramite ricevitori piani a mini e micro-canali in dispositivi solari a concentrazione

L'utilizzo di energia termica a media temperatura (tra 80 e 250°C) è molto comune in ambito industriale nei settori alimentare, tessile e chimico, dove peraltro la richiesta di energia è circa costante nell'arco dell'intero anno. L'utilizzo di sistemi solari per la produzione di tale energia permette di ridurre le emissioni di gas responsabili dell'effetto serra. I collettori solari tradizionali piani o a tubi evacuati non hanno efficienze soddisfacenti nelle applicazioni a media temperatura, pertanto l'attenzione deve essere rivolta a sistemi solari a concentrazione. Come viene evidenziato dalla letteratura scientifica, la geometria di concentratore solare più adatta alla produzione di energia termica è quella a fuoco lineare e comprende due tipologie di sistemi: i sistemi a specchi parabolici e i sistemi lineari Fresnel. Essi si basano entrambi sull'utilizzo di eliostati lineari. In tali sistemi sono impiegati ricevitori di dimensione molto inferiore rispetto ai comuni collettori solari e questo aspetto, insieme con una progettazione volta a massimizzare l'efficienza dell'assorbimento radiativo e dello scambio termico convettivo, può portare ad avere prestazioni eccellenti nell'intervallo di temperatura in esame. La tipica geometria del ricevitore nei sistemi solari a concentrazione per applicazioni nella media temperatura è tubolare, mentre nel presente progetto viene fatta una proposta del tutto innovativa.

La progettazione del ricevitore è volta a realizzare un sistema nuovo in cui l'efficienza del sistema rimanga alta anche quando l'energia termica è resa disponibile a temperature fino a 180°C. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario rendere molto efficiente lo scambio termico sulla superficie del ricevitore su cui incide la radiazione solare concentrata. In questo modo, infatti, la temperatura di tale superficie rimane più vicina a quella del fluido operativo e ciò consente di ridurre le dissipazioni per convezione e radiazione con l'ambiente esterno. Una delle tecnologie più utilizzate e diffuse per asportare efficacemente elevati flussi termici da superfici di scambio di ridotta dimensione geometrica è quella dei mini e microcanali, cioè di canali con diametri idraulici inferiori a 3 mm. In elettronica, sono ampiamente utilizzati per il raffreddamento di dispositivi di piccole dimensioni soggetti a flussi termici particolarmente elevati, fino a 300 W/cm^2.

Nei dispositivi a concentrazione, l'utilizzo della tecnologia dei mini e microcanali risulta interessante perché il flusso incidente sul ricevitore è dell'ordine di qualche decina di kW/m^2. Inoltre, rispetto allo scambio termico in condizioni di deflusso monofase, l'utilizzo di un fluido in vaporizzazione all'interno dei minicanali per asportare il flusso concentrato consente di avere coefficienti di scambio termico molto elevati e una maggiore uniformità di temperatura, dovuta al fatto che la vaporizzazione in condizioni isobare è anche isoterma. I microcanali si prestano con facilità ad essere integrati sia in ricevitori tubolari che in ricevitori piani. Una geometria piana del ricevitore è adatta all'installazione su dispositivi con ottica primaria asimmetrica che sono di minore ingombro rispetto ai tradizionali concentratori ad ottica simmetrica. Inoltre, consente da un lato di avere una maggiore uniformità di flusso incidente su ogni singolo minicanale e dall'altro di isolare posteriormente il ricevitore.

E' stata effettuata una ricerca bibliografica sull'utilizzo di ricevitori a mini e microcanali grazie alla quale si è potuto appurare che non esistono sistemi di questo tipo, fornendo una ulteriore conferma della innovatività e originalità della presente proposta.

Progettazione, realizzazione e sperimentazione di un ricevitore a minicanali in grado di asportare il flusso radiante prodotto dalla radiazione concentrata, attraverso l'utilizzo di fluidi in cambiamento di fase

Il ricevitore progettato per la produzione di calore a media temperatura è costituito da una piastra piana in alluminio a sezione rettangolare, avente una lunghezza di 1,2 m. La superficie del ricevitore su cui giunge la radiazione concentrata è dotata di una vernice semiselettiva antigraffio nera con un coefficiente di assorbimento del 90% e una emissività del 37%. Dato che la vernice resiste agli agenti atmosferici, non è stata utilizzata alcuna copertura vetrata. In alcuni studi disponibili in letteratura relativi a concentratori solari per la produzione di calore

a media temperatura, si è valutato di non utilizzare alcuna copertura vetrata, poiché rappresenta un costo in più che non è giustificato dal guadagno in termini di energia termica utile che si può ricavare. Il ricevitore è dotato di due ingressi laterali e di un'uscita centrale (Figura 476).



Figura 476. Ricevitore a minicanali per la produzione di calore a media temperatura

Le prestazioni del ricevitore sono state caratterizzate sperimentalmente in un impianto di prova progettato e realizzato presso il Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. Presso il Laboratorio, è stato installato un concentratore a specchi parabolici e a fuoco lineare la cui ottica primaria è costituita da quattro specchi che formano un cilindro parabolico la cui sezione è data da uno solo dei due rami di una parabola (Figura 477). La distanza focale è di 1,81 m, l'altezza della semiparabola è di 2,86 m e la lunghezza focale è di 2,4 m. Il concentratore insegue il sole tramite una movimentazione a due assi. La componente diretta dell'irradianza solare è misurata tramite un pireliometro installato su un inseguitore solare ad elevata precisione.

Il circuito di prova realizzato comprende un circuito primario in cui scorre acqua distillata ed un circuito secondario di raffreddamento. Nel circuito primario, il fluido operativo in uscita dalla sezione di misura costituita dal ricevitore, entra in uno scambiatore di calore a tubi concentrici che ha la funzione di trasferire il calore ricevuto dal fluido primario al fluido del circuito secondario. Il fluido operativo esce dallo scambiatore in condizioni di liquido sottoraffreddato e passa attraverso una pompa ad ingranaggi a numero di giri variabile, con cui è possibile impostare la portata di massa che viene misurata tramite un misuratore ad effetto Coriolis. L'impianto è dotato di un vaso di espansione che permette di variare la pressione dell'impianto. Prima di rientrare nel ricevitore, il fluido operativo passa attraverso una sezione di preriscaldamento costituita da una resistenza elettrica avvolta all'esterno del tubo e controllata con un termoregolatore PID collegato con un relè allo stato solido e con una termocoppia posta sulla superficie esterna del tubo in acciaio inox a valle della sezione di preriscaldamento per mantenere costante il grado di sottoraffreddamento in ingresso.



Figura 477. Concentratore a specchi parabolici a fuoco lineare

Sono stati installati tre trasduttori assoluti di pressione nel circuito primario per rilevare la pressione del fluido operativo in ingresso ed in uscita dal ricevitore ed in uscita dallo scambiatore di calore. Tutti i sensori di temperatura utilizzati sono termoresistenze Pt100 di classe 1/10 DIN. Due termoresistenze vengono impiegate per rilevare la temperatura di ingresso e di uscita del fluido secondario nello scambiatore. Altri sensori di temperatura sono stati posti nel circuito primario, rispettivamente per misurare la temperatura del fluido all'uscita della sezione di preriscaldamento, all'ingresso ed all'uscita del ricevitore ed all'uscita dello scambiatore di calore.

Per garantire un'elevata accuratezza nelle misure, le termoresistenze sono state calibrate. Durante la calibrazione, il valore misurato dalle termoresistenze collegate con il sistema di acquisizione dei dati è confrontato con il valore misurato da un termistore collegato con lo strumento SuperThermometer II di Hart Scientific. La catena di misura termistore + SuperThermometer ha un'accuratezza inferiore a 0,01°C. Dopo la calibrazione, vengono definite delle funzioni di correzione dei valori misurati dai sensori di temperatura per avere una precisione entro ±0.03°C.

Durante le prove sperimentali con fluido in cambiamento di fase all'interno del ricevitore, la temperatura di saturazione è compresa tra 115 e 130°C; con la presente configurazione della sezione di misura, sono stati riscontrate e descritte alcune instabilità connesse con la vaporizzazione all'interno dei minicanali. Inoltre, il ricevitore a minicanali è stato testato anche in condizioni di deflusso monofase, con temperatura media del fluido tra 110 e 125°C per confrontare le prestazioni rispetto al caso in cui vi sia vapore saturo all'uscita.

Le prestazioni ottiche del ricevitore installato sul concentratore solare disponibile presso il Laboratorio di Conversione dell'energia solare sono state valutate utilizzando il software di ray-tacing SolTrace. Attraverso il modello ottico realizzato sono stati in particolare stimati il rendimento ottico e la distribuzione media di flusso concentrato sulla sezione trasversale del ricevitore. Sono state infine valutate le metodologie disponibili per la misura del flusso concentrato sul ricevitore, prese da quelle applicate in generale a sistemi solari a torre ad alta concentrazione, al fine di poter effettuare la misura diretta della radiazione concentrata sul presente ricevitore.

In conclusione nel quadro della subtask b.2 sono state condotte attività di analisi, sviluppo e sperimentazione di concentratori solari che utilizzano ricevitori innovativi basati sulla tecnologia dei mini e micro-canali. Sono state dapprima condotte attività di indagine teorica sui possibili miglioramenti termo-fluidodinamici introdotti dall'uso dei mini e micro-canali in ricevitori aventi geometrie sia di tipo convenzionale che non. Da tale indagine preliminare ne è scaturita la definizione di una soluzione innovativa, rappresentata da un ricevitore a geometria piana, che è stata successivamente implementata in un prototipo. Tale prototipo è stato oggetto di prove sperimentali presso il Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, dove sono state opportunamente caratterizzate le prestazioni energetiche sia con fluido in cambiamento di fase sia in condizioni di deflusso monofase.

I risultati sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2013/163 e RdS/PAR2013/162.

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 Prove sperimentali comparative sui prototipi di pompa di calore a R134a e Propano R290

L'attività di ricerca è stata svolta con il contributo dell'Università di Napoli "Federico II", Dipartimento di Ingegneria Industriale, che ha curato l'analisi dei risultati delle prove sperimentali di due prototipi di macchine a compressione di vapore (uno operante con R290 e uno con R134a), al fine di determinarne le prestazioni al variare delle condizioni al contorno (temperatura dell'ambiente, portata e temperature dell'acqua).

ENEA si è occupata dei test sperimentali dei prototipi realizzando una matrice di prove impostata secondo la normativa vigente (UNI EN 14511-parte 3 e UNI EN 14825:2013). L'attività è stata realizzata nelle seguenti fasi:

- preparazione ed esecuzione della campagna sperimentale sui due prototipi presso l'impianto "Calorimetro ENEA", sito presso l'istituto di ricerca ENEA Casaccia, sia in regime invernale (modalità pompa di calore), sia in regime estivo (modalità macchina frigorifera);
- elaborazione dei dati sperimentali;
- analisi dei risultati per il calcolo dei parametri di prestazione a carico parziale e stagionale in accordo con le normative vigenti;
- interpretazione dei risultati al fine della valutazione dell'impatto ambientale diretto e indiretto nel caso di impiego di tali macchine nella climatizzazione residenziale.

Per la realizzazione di questa attività si è proceduto alla preliminare progettazione e costruzione di un nuovo impianto sperimentale denominato "Calorimetro ENEA". Sono stati condotti test sui due prototipi, funzionanti rispettivamente con R134a e propano, in differenti condizioni di funzionamento, sia in regime invernale (modalità pompa di calore) che in regime estivo (modalità macchina frigorifera). Per ognuna delle singole prove sperimentali, sono stati elaborati e ridotti i dati, successivamente utilizzati per la stima delle prestazioni stagionali durante la climatizzazione estiva ed invernale. Sono stati confrontati i relativi indici di prestazione stagionali, base oggettiva di confronto tra i due prototipi e con altri esistenti sul mercato, a parità di condizioni climatiche e di utenza. Infine, è stata condotta la valutazione del contributo totale all'effetto serra (essendo il potenziale di distruzione dell'ozono nullo per entrambi i fluidi investigati) tramite il TEWI, valutato nelle sue aliquote.

Impianto sperimentale

L'impianto "Calorimetro ENEA" allestito presso l'edificio F40 del Centro ricerche Enea Casaccia di Roma consente di testare pompe di calore aria/acqua reversibili con potenza termica fino a 50 kW in accordo alla norma UNI-EN 14511 del novembre 2011 (Figura 478). In esso coesistono tre diversi sistemi, che devono essere gestiti simultaneamente:

- Camera climatica, con la quale si gestiscono le condizioni termoigrometriche dell'aria che arriva sullo scambiatore ad aria della macchina in test;
- Loop idronico, che consente di gestire la portata e la temperatura dell'acqua avviata alla macchina in test;
- Macchina in test stessa, che deve essere opportunamente strumentata e monitorata per controllare il raggiungimento di condizioni di funzionamento stabili.



Figura 478. Camera climatica "Calorimetro ENEA" con prototipo a R134a in allestimento

La camera climatica consente di controllare e misurare la temperatura e l'umidità dell'aria che investe lo scambiatore ad aria in modo da rispettare le richieste della UNI EN 14511 in termini di accuratezza delle misure e di stabilità delle condizioni di prova. In Tabella 116 le principali caratteristiche della camera climatica.

Tabella 116. Principali caratteristiche camera climatica

Produttore	Angelantoni
Dimensioni Interne	4,70 m [L] x 5,50 m [P] x 4,60 m [H]
Superficie utile	26 m^2
Volume utile	120 m^3
Temperatura di esercizio	-15°C ÷ 35°C
Umidità Relativa	10% ÷ 95% (controllata da 10°C a 35°C)
Velocità aria	< 1 m/s (UNI EN 14511-3:2011 Appendice A –A.1.2)
Potenza elettrica massima assorbita	80 kW
Potenza frigorifera massima smaltibile	50 kW

L'intero sistema della camera climatica è controllato da un sistema PLC implementato, creato e programmato dal produttore in modo che il tutto sia gestito in modo totalmente automatico.

L'impianto idronico consente di controllare e misurare la portata e la temperatura dell'acqua elaborata per mezzo di un apposito loop di cui in Figura 479 si riporta lo schema d'impianto.

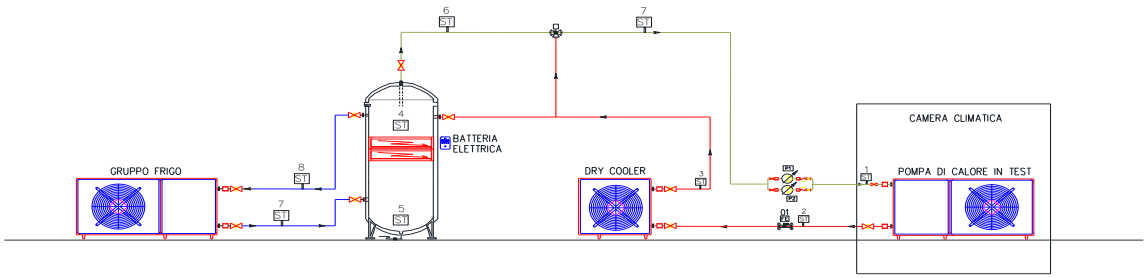


Figura 479. Schema dell'impianto idronico del "Calorimetro ENEA"

I principali componenti dell'anello sono:

- Serbatoio d'accumulo da 1000 L dotato di resistenze elettriche da 7.5 kW ciascuna;
- Gruppo Frigo Climaveneta da 8 kW frigoriferi con inverter a bordo;
- Dry-Cooler Alpha-Laval da 60 kW termici con inverter a bordo;
- Valvola miscelatrice a tre vie.

La preparazione dell'acqua in ingresso alla macchina in prova richiede la disponibilità di due sorgenti termiche, una calda ed una fredda. Per incrementare la flessibilità operativa del loop, gestito da un sistema di controllo completamente automatico, si è progettato l'impianto in modo che la funzione di sorgente calda e di sorgente fredda possa essere svolta indifferentemente dal serbatoio d'accumulo e dall'acqua uscente dal dry-cooler. La valvola miscelatrice a tre vie provvede poi a miscelare opportunamente i flussi termici caldi e freddi.

La facility realizzata si avvale dei seguenti software:

- Ultrasite32, che consente di gestire l'anello idronico e di scegliere la modalità di funzionamento della macchina in prova (pompa di calore o macchina frigo), la velocità di rotazione del compressore della macchina in prova (qualora esso sia dotato di inverter), la fase di defrost della macchina in prova;
- Winkratos, che consente di gestire i valori di temperatura ed umidità relativa dell'aria in camera climatica. La camera può inoltre essere totalmente gestita anche tramite il pannello touch screen presente sul quadro elettrico;
- Labview attraverso il quale, una volta avviata la pompa di calore in prova, è possibile registrare i dati sperimentali con un programma realizzato su misura per ogni macchina in prova.

Modalità di esecuzione delle prove sperimentali

La matrice di prova è stata determinata in accordo alle normative di riferimento per il test di pompe di calore (UNI EN 14511- 3 ed UNI EN 14825:2013). In particolare, i singoli test sono stati condotti seguendo le prescrizioni della normativa UNI EN 14511- 3, che prevede l'esecuzione delle seguenti fasi:

- periodo di condizionamento, nel quale l'apparecchiatura di ricondizionamento della camera di prova e la pompa di calore sottoposta a prova devono essere azionate sino a ottenere le tolleranze di prova specificate nel prospetto 4 della norma per almeno 10 minuti;
- periodo di equilibrio, che segue immediatamente il condizionamento ed un periodo di recupero di 10 minuti che conclude il condizionamento;
- periodo di raccolta dati, nel quale i dati sono stati campionati ogni 0,5 s.

Ogni prova è stata considerata stabile quando tutte le grandezze misurate si sono mantenute entro gli scostamenti ammissibili dai valori impostati, riportati nel prospetto 4 della stessa normativa.

Per il prototipo a R134a, sono state testate 37 condizioni di funzionamento in regime invernale, con $T_{in,w}$ comprese tra 30 e 40 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 35 e 45 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc}, comprese tra -15 e 12 °C, e per differenti frequenze del compressore, f_{comp}, pari a 40, 50 e 60 Hz. In modalità macchina frigorifera, invece, le diverse condizioni di funzionamento sono state 12, con $T_{in,w}$ comprese tra 12 e 23 °C, $T_{out,w}$ comprese tra 7 e 18 °C, per differenti temperature della camera climatica, T_{cc}, comprese tra 20 e 35 °C, e per una frequenze del compressore, f_{comp}, pari a 50 Hz. Per il prototipo a propano sono state eseguite le stesse prove ad eccezione di quelle a 40 Hz.

Esempio di analisi delle prestazioni del prototipo funzionante in modalità pompa di calore con R134a in regime invernale

Le condizioni di prova prese in esame in questo esempio sono le seguenti $T_{in,w}$ = 40 °C, $T_{out,w}$ = 45 °C, T_{cc} = 7 °C, f_{comp}= 50 Hz. Con riferimento alla prova in questione, la Figura 480 mostra le trasformazioni sui piani termodinamici T-s e p-h, mentre nelle tabelle 117-119 si riportano i valori delle principali grandezze calcolate.

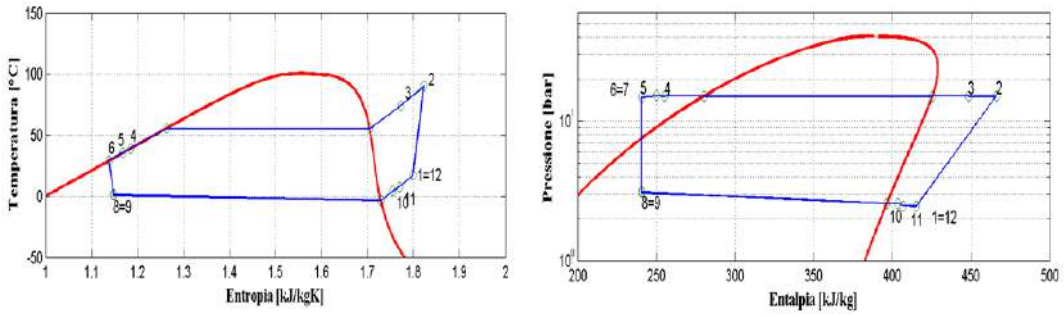


Figura 480. Piano T-s e p-h per la prova in esame

Tabella 117. Riepilogo della principali grandezze misurate e calcolate per la prova in esame

Riepilogo												
m_a [kg/s]	Q_{co} [kW]	m_r [kg/s]	Q_{ev} [kW]	Q_{rig} [kW]	$W_{c,is}$ [kW]	$W_{c,el}$ [kW]	$W_{c,ass}$ [kW]	η_{is}	η_g	COP_{is}	COP_{el}	COP_{ass}
0,16	3,53	0,02	2,98	0,17	0,78	1,33	1,73	0,83	0,59	4,53	2,66	2,04

Tabella 118. Riepilogo della principali grandezze misurate e calcolate per la prova in esame, relative al condensatore

Condensatore						
ΔP_{co} [bar]	$T_{in,w}$ [°C]	$T_{out,w}$ [°C]	$T_{r,in}$ [°C]	$T_{r,out}$ [°C]	ΔT_{ml} [°C]	UA_{co} [kW/K]
0,02	40,04	45,18	74,34	39,20	7,98	0,44

Tabella 119. Riepilogo della principali grandezze misurate e calcolate per la prova in esame, relative all'evaporatore

Evaporatore						
ΔP_{ev} [bar]	$T_{in,ev}$ [°C]	$T_{out,ev}$ [°C]	T_{evap_media} [°C]	T_{aria_in} [°C]	Q_{evap} [kW]	UA_{ev} [kW/K]
0,51	0,92	4,25	-1,34	6,78	2,85	0,35

Calcolo dell'incertezza sulle grandezze misurate

Per le principali grandezze di interesse sono state poi calcolate le incertezze di misura tramite la legge di propagazione dell'incertezza, in accordo con le normative vigenti.

Il modello utilizzato per il calcolo della potenza scambiata al condensatore è espresso dalla:

$$\dot{Q}_{co} = \rho_w \cdot \dot{V}_w \cdot c_w \cdot \left(T_{w,out} - T_{w,in}\right) \quad [kW]$$

dalla quale è possibile calcolare, tramite la legge di propagazione, l'incertezza composta associata, essendo la potenza scambiata al condenzatore una grandezze misurata indirettamente. L'espressione tramite la quale si calcola questa incertezza è:

$$u_c\left(\dot{Q}_{co}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^{5}\left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(\mathrm{x}_i)\right]} =$$

$$= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial \rho_w}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(\rho_w)\right] + \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial \dot{V}_w}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(\dot{V}_w)\right] + \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial c_w}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(c_w)\right] + \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial T_{w,out}}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(T_{w,out})\right] + \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}_{co}}{\partial T_{w,in}}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(T_{w,in})\right]}$$

dove le varie u_c relative alle varie grandezze che compaiono nella relazione precedente sono ricavate combinando insieme le incertezze tipo di categoria A con quelle di categoria B, secondo la relazione:

$$u_c = \sqrt{u_A^{\,2} + u_B^{\,2}}$$

Lo stesso procedimento è stato sviluppato per il calcolo del COP; in questo caso, il modello utilizzato è dato dall'equazione:

$$COP_d = \frac{\dot{Q}_{co}}{W_{ass}}$$

mentre la relazione per il calcolo dell'incertezza deriva dalla relazione.

$$u_c\left(COP_d\right) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial COP_d}{\partial \dot{Q}_{co}}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(\dot{Q}_{co})\right] + \left[\left(\frac{\partial COP_d}{\partial W_{ass}}\right)^2 \cdot u_c^{\,2}(W_{ass})\right]}$$

Nella Tabella 120 sono riportati i valori delle incertezze calcolati.

Tabella 120. Principali dati misurati con le relative incertezze in modalità pompa di calore

$\dot{Q}_{co}$±$u_C(\dot{Q}_{co})$	Wis+u_C (W_{is})	W_{el}+u_C (W_{el})	W_{ass}±u_C (W_{ass})	COP_{is}±u_C (COP_{is})	COP_{el}±u_C (COP_{el})	COP_{ass}±u_C (COP_{ass})
3.5±0.2	0.78±0.05	1.329±0.006	1.729±0.006	4.5±0.4	2.7±0.2	2.0±0.1

Calcolo SCOP – R134a

Per il calcolo del coefficiente di prestazione stagionale in modalità pompa di calore, SCOP, per il prototipo elaborante R134a, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 14825 per le condizioni di prova da seguire. Nella Tabella 121 vengono riportati i valori delle grandezze misurate, utili ai fini del calcolo dello SCOP.

Tabella 121. Riepilogo delle condizioni di prova per il calcolo dello SCOP per il prototipo elaborante R134a, $_{out,w}$=45°C, frequenza compressore 50 Hz

		Average		Outdoor heat exchanger	Indoor heat exchanger						
		Part load ratio	Part load ratio %	Outdoor air	Inlet/outlet temperature						
				Inlet dry bulb (wet bulb) Temperature °C	*Fixed outlet* °C	$\dot{m}_w$ [kg/h]	$\dot{Q}_{co}$ [kW]	W_{el} [kW]	W_{ass} [kW]	COP_{el}	COP_{ass}
$T_{out,w}$ = 45 °C, G = 595 kg/h, T_{cc} = -7 °C, f = 50Hz	A	(-7-16)/(Tdesignh -16)	88	-7(-8)	a / 45	590	1,74	1,02	1,42	1,71	1,23
$T_{out,w}$ = 45°C, G_w = 595 kg/h, T_{cc} = 2 °C, f = 50Hz	B	(+2-16)/(Tdesignh -16)	54	2(1)	a / 45	592	2,79	1,22	1,62	2,28	1,72
$T_{in,w}$ = 40 °C, $T_{out,w}$ = 45°C, T_{cc} = 7 °C, f = 50Hz	C	(+7-16)/(Tdesignh -16)	35	7(6)	a / 45	591	3,53	1,33	1,73	2,66	2,04
$T_{out,w}$ = 45 °C, G = 595 kg/h, T_{cc} = 12 °C, f = 50Hz	D	(+12-16)/(Tdesignh -16)	15	12(11)	a / 45	595	4,30	1,47	1,87	2,93	2,30
	E	(TOL-16)/(Tdesignh -16)		TOL	a / 45						
	F	(Tbivalent-16)/(Tdesignh -16)		Tbivalent	a / 45						
	a With the water flow rate as determined at the standard rating conditions given in EN 14511-2 at 40/45 conditions for units with a fixed water flow rate, and with a fixed delta T of 5 K for units with a variable flow rate										

Nella Figura 481 vengono riportati, in funzione della temperatura esterna, gli andamenti delle grandezze necessarie al calcolo dello SCOP. I valori finali dello SCOP sono i seguenti:

$$SCOP_{ON_el} = 1,81$$

$$SCOP_{NET_el} = 1,82$$

$$SCOP_{el} = 1,78$$

Sempre tramite la legge di propagazione dell'incertezza si è andati a valutare anche le incertezze legate a tali grandezze, i cui valori sono riportati nella Tabella 122.

Tabella 122. Incertezze relative ai vari valori dello SCOP misurati

uR($SCOP_{ON_el}$)	uR($SCOP_{NET_el}$)	uR($SCOP_{el}$)
10,37 %	8,65 %	10,19 %

Bisogna considerare che i valori dello SCOP ottenuti dipendono anche dalla curva di richiesta termica dell'utenza, curva che è stata ipotizzata seguendo l'esempio riportato nella norma di riferimento.

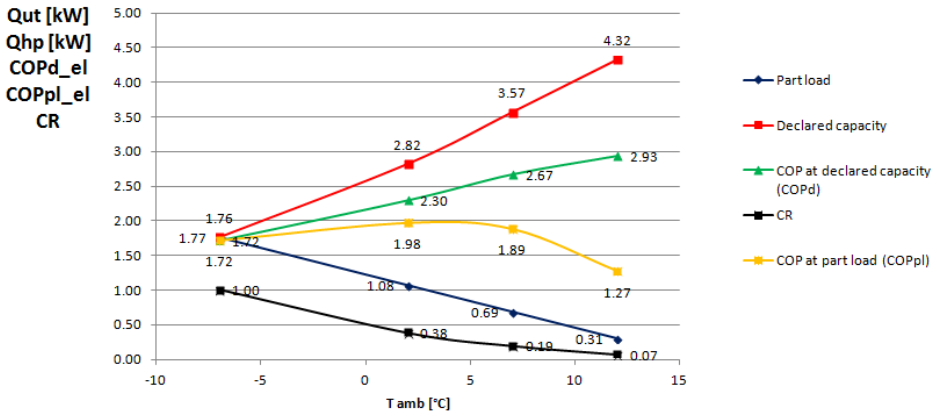


Figura 481. Andamento in funzione della temperatura esterna della potenza termica fornita dalla pompa di calore ad R134a, della potenza richiesta dall'utenza, del rapporto di capacità CR, del COP dichiarato della pompa di calore e del COP a carico parziale, questi ultimi valutati considerando come spesa energetica la potenza elettrica assorbita dal solo compressore

Calcolo SEER – R134a

Per il calcolo del coefficiente di prestazione stagionale in modalità macchina frigorifera, SEER, per il prototipo elaborante R134a, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 14825 per le condizioni di prova da seguire. Nella Tabella 122 vengono riportati i valori delle grandezze misurate, utili ai fini del calcolo dell'SEER.

Tabella 123. Riepilogo delle condizioni di prova per il calcolo dello SEER per il prototipo elaborante R134a

		Average		Outdoor heat exchanger	Indoor heat exchanger							
		Part load ratio	Part load ratio %	Air dry bulb temperature [°C]	Fan coil application Inlet/outlet water temperatures							
					Fixed outlet [°C]	$\dot{m}_w$ [kg/h]	Q_{ev} [kW]	W_{el} [kW]	W_{ass} [kW]	EER_{el}	EER_{ass}	T_{amb} [°C]
$T_{in,w}$ = 12 °C, $T_{out,w}$ = 7 °C T_{cc} = 35 °C, f = 50Hz,	A	(35-16)/(Tdesignc -16)	100	35	12 / 7	591	3,43	1,39	1,79	2,46	1,91	34,6
$T_{out,w}$ = 7 °C, G = 590 kg/h, T_{cc} = 30, f= 50Hz,	B	(30-16)/(Tdesignc -16)	74	30	a / 7	533	3,65	1,34	1,74	2,73	2,10	29,7
$T_{out,w}$ = 7 °C, G = 590 kg/h, T_{cc} = 25 °C, f = 50Hz,	C	(25-16)/(Tdesignc -16)	47	25	a / 7	595	3,80	1,28	1,68	2,96	2,26	24,9
$T_{out,w}$ = 7 °C, G = 590 kg/h, T_{cc} = 20 °C, f = 50Hz,	D	(20-16)/(Tdesignc -16)	21	20	a / 7	590	3,96	1,22	1,62	3,26	2,45	19,7
	a With the water flow rate as determined during "A" test for units with a fixed water flow rate or with a fixed delta T of 5 K for units with a variable water flow rate											

Nella Figura 482 vengono riportati, in funzione della temperatura esterna, gli andamenti delle grandezze necessarie al calcolo dell'SEER. I valori finali dell'SEER sono i seguenti:

$$SEER_{ON_el} = 2,49$$

$$SEER_{el} = 1,06$$

Bisogna considerare che i valori dell'SEER ottenuti dipendono anche dalla curva di richiesta termica dell'utenza, curva che è stata ipotizzata seguendo l'esempio riportato nella norma di riferimento.

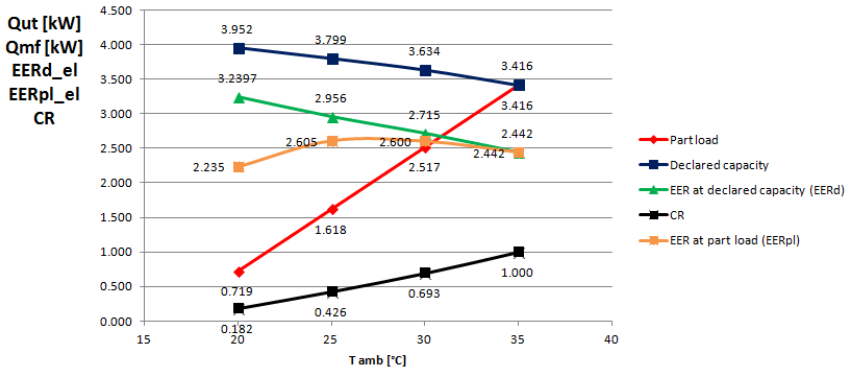


Figura 482. Andamento in funzione della temperatura esterna della potenza termica fornita dalla macchina frigorifera ad R134a, della potenza richiesta dall'utenza , del rapporto di capacità CR, dell'EER dichiarato della pompa di calore e dell'EER a carico parziale questi ultimi valutati considerando come spesa energetica la potenza elettrica assorbita dal solo compressore

Calcolo SCOP – R290

Per il calcolo del coefficiente di prestazione stagionale in modalità pompa di calore, SCOP, per il prototipo elaborante R290, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 14825 per le condizioni di prova da seguire. Nella Tabella 124 vengono riportati i valori delle grandezze misurate, utili ai fini del calcolo dello SCOP.

Nella Figura 483 vengono riportati, in funzione della temperatura esterna, gli andamenti delle grandezze necessarie al calcolo dello SCOP.

I valori finali dello SCOP sono i seguenti:

$$SCOP_{ON_el} = 1,78$$

$$SCOP_{NET_el} = 1,79$$

$$SCOP_{el} = 1,75$$

Bisogna considerare che i valori dello SCOP ottenuti dipendono anche dalla curva di richiesta termica dell'utenza, curva che è stata ipotizzata seguendo l'esempio riportato nella norma di riferimento.

Tabella 124. Condizioni di prova per il calcolo dello SCOP per il prototipo elaborante R290

		Average		Outdoor heat exchanger b	Indoor heat exchanger							
		Part load ratio	Part load ratio %	Outdoor air	Inlet/outlet temperature							
				Inlet dry bulb (wet bulb) Temperature °C	*Fixed outlet °C*	$\dot{m}_w$ [kg/h]	$\dot{Q}_{co}$ [kW]	W_{el} [kW]	W_{ass} [kW]	COP_{el}	COP_{ass}	T_{amb} [°C]
$T_{out,w}$ = 45 °C, G = 613 kg/h, T_{cc} = -7 °C, f = 50Hz	A	(-7-16)/(Tdesignh -16)	88	-7(-8)	a / 45	609	1,77	1,17	1,59	1,51	1,11	-6,99
$T_{out,w}$ = 45°C, G = 613 kg/h, T_{cc} = 2 °C, f = 50Hz	B	(+2-16)/(Tdesignh -16)	54	2(1)	a / 45	606	2,99	1,28	1,70	2,34	1,76	1,97
$T_{in,w}$ = 40 °C, $T_{out,w}$ = 45°C, T_{cc} = 7 °C, f = 50Hz	C	(+7-16)/(Tdesignh -16)	35	7(6)	a / 45	603	3,56	1,36	1,78	2,61	2,00	7,04
$T_{out,w}$ = 45 °C, G = 613 kg/h, T_{cc} = 12 °C, f = 50Hz	D	(+12-16)/(Tdesignh -16)	15	12(11)	a / 45	608	4,38	1,40	1,82	3,13	2,41	11,89
	E	(TOL-16)/(Tdesignh -16)		TOL	a / 45							
	F	(Tbivalent-16)/(Tdesignh -16)		Tbivalent	a / 45							

a With the water flow rate as determined at the standard rating conditions given in EN 14511-2 at 40/45 conditions for units with a fixed water flow rate, and with a fixed delta T of 5 K for units with a variable flow rate.

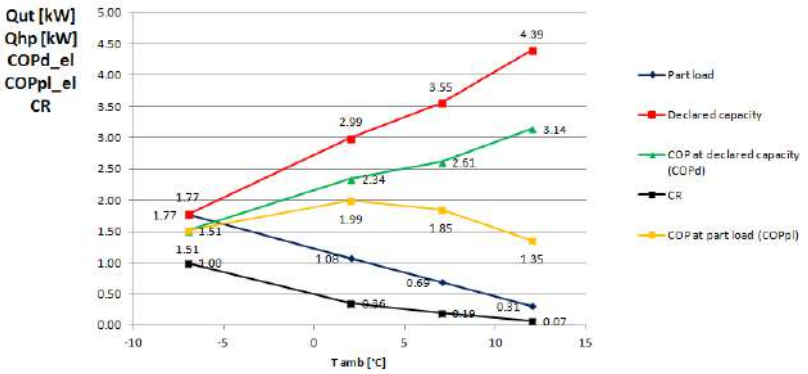


Figura 483. Andamento in funzione della temperatura esterna della potenza termica fornita dalla pompa di calore con R290 della potenza richiesta dall'utenza, del rapporto di capacità CR, del COP dichiarato della pompa di calore e del COP a carico parziale questi ultimi valutati considerando come spesa energetica la potenza elettrica assorbita dal solo compressore

Calcolo SEER – R290

Per il calcolo del coefficiente di prestazione stagionale in modalità macchina frigorifera, SEER, per il prototipo elaborante R290, si è fatto riferimento alla norma UNI EN 14825 per le condizioni di prova da seguire. Nella tabella 125 vengono riportati i valori delle grandezze misurate, utili ai fini del calcolo dell'SEER.

Tabella 125. Condizioni di prova per il calcolo dello SEER per il prototipo elaborante R290

		Average		Outdoor heat exchanger	Indoor heat exchanger							
		Part load ratio	Part load ratio %	Air dry bulb temperature [°C]	Fan coil application Inlet/outlet water temperatures							
					Fixed outlet [°C]	$\dot{m}_w$ [kg/h]	Q_{ev} [kW]	W_{el} [kW]	W_{ass} [kW]	EER_{el}	EER_{ass}	T_{amb} [°C]
$T_{in,w}$ = 12 °C, $T_{out,w}$ = 7 °C T_{cc} = 35 °C, f = 50Hz,	A	(35-16)/(Tdesignc -16)	100	35	12 / 7	635	3,63	1,44	1,86	2,51	1,95	34,98
$T_{out,w}$ = 7 °C, G = 634 kg/h, T_{cc} = 30, f = 50Hz,	B	(30-16)/(Tdesignc -16)	74	30	a / 7	631	3,96	1,32	1,74	3,00	2,28	29,95
$T_{out,w}$ = 7 °C, G_w = 634 kg/h, T_{cc} = 25 °C, f = 50Hz,	C	(25-16)/(Tdesignc -16)	47	25	a / 7	632	4,29	1,19	1,61	3,60	2,66	25,02
$T_{out,w}$ = 7 °C, G = 634 kg/h, T_{cc} = 20 °C, f = 50Hz,	D	(20-16)/(Tdesignc -16)	21	20	a / 7	632	4,55	1,10	1,52	4,14	2,99	19,95

a With the water flow rate as determined during "A" test for units with a fixed water flow rate or with a fixed delta T of 5 K for units with a variable water flow rate.

Nella Figura 484 vengono riportati, in funzione della temperatura esterna, gli andamenti delle grandezze necessarie al calcolo dell'SEER.

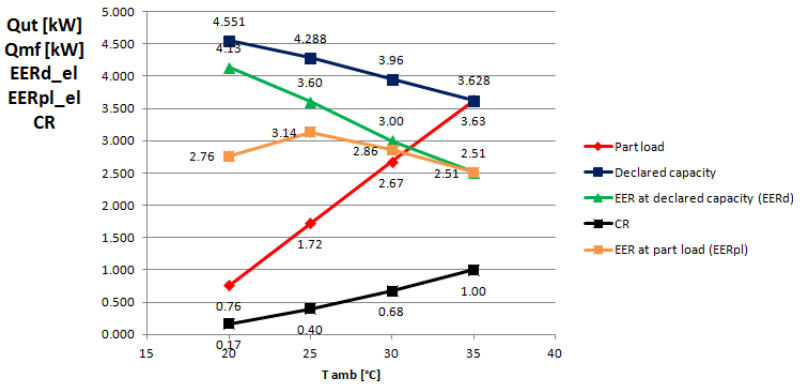


Figura 484. Andamento in funzione della temperatura esterna della potenza termica fornita dalla macchina frigorifera con R290, della potenza richiesta dall'utenza, del rapporto di capacità CR, dell'EER dichiarato della pompa di calore e dell'EER a carico parziale questi ultimi valutati considerando come spesa energetica la potenza elettrica assorbita dal solo compressore

I valori finali dell'SEER sono i seguenti:

$$SEER_{ON_el} = 2{,}91$$

$$SEER_{el} = 1{,}17$$

Bisogna considerare che i valori dell'SEER ottenuti dipendono anche dalla curva di richiesta termica dell'utenza, curva che è stata ipotizzata seguendo l'esempio riportato nella norma di riferimento.

Confronto indici di prestazione dei fluidi

Considerando la Tabella 124, dal confronto degli indici di prestazione invernale (SCOP) si nota che essi sono all'incirca uguali per i due fluidi, con una prestazione leggermente migliore del R134a a basse temperature e del propano a temperature più elevate. Invece, in termini di indici di prestazione estiva (SEER) il propano dimostra di essere più vantaggioso del R134a con valori dell'EER mediamente più alti fino al 27%.

Tabella 126. Riepilogo principali indici di prestazione stagionale dei due fluidi in esame

Indice di prestazione	R134a	R290
SCOP_ON	1,81	1,78
SEER_ON	2,49	2,91

Calcolo del TEWI

In particolare, il TEWI (Total Equivalent Warming Impact) nelle sue aliquote (emissione diretta ed indiretta) è stato calcolato tramite la relazione

$$TEWI = Eff.\ diretto + Eff.\ indiretto = m \cdot GHP + \alpha_{CO_2} \cdot T \cdot e$$

indicando con *m* la massa di refrigerante complessivamente dispersa in atmosfera durante la vita della macchina, con *GWP* il Global Warming Potential del refrigerante, con α_{CO_2} la massa di CO_2 emessa per unità di energia elettrica utilizzata dalla macchina oggetto di studio (dipendente dal sistema di produzione della singola nazione e più nel dettaglio dalla specifica fonte di approvvigionamento), *T* è il tempo di vita della macchina ed *e* è l'energia elettrica mediamente consumata nell'unità di tempo, ovvero la potenza media necessaria per il funzionamento della macchina.

Si è ipotizzata una perdita di refrigerante annua del 15% per la macchina operante con R134a e del 2% per il prototipo a propano. Il tempo di vita della macchina è stato posto pari a 7 anni mentre si è fissato una valore per il coefficiente α_{CO_2} pari a 0,4 kg CO_2/kWh$_{el}$. Per quanto riguarda, infine, i consumi elettrici, essi sono stati calcolati sempre secondo la norma di riferimento UNI EN 14825, considerando, per un regime climatico di riferimento medio, un numero di ore equivalenti per il riscaldamento e per il raffrescamento rispettivamente pari a 1400 h e

350 h. In particolare il parametro *e* può essere ricavato per il periodo di riscaldamento e per quello di raffrescamento con le relazioni:

$$e_{risc} = \frac{Q_H}{SCOP_{ON}} + H_{TO} \cdot P_{TO} + H_{SB} \cdot P_{SB} + H_{CK} \cdot P_{CK} + H_{OFF} \cdot P_{OFF}$$

$$e_{raff} = \frac{Q_C}{SEER_{ON}} + H_{TO} \cdot P_{TO} + H_{SB} \cdot P_{SB} + H_{CK} \cdot P_{CK} + H_{OFF} \cdot P_{OFF}$$

Dove H_{TO}, H_{SB}, H_{CK} ,H_{OFF} rappresentano le ore di funzionamento nelle modalità termostato spento, standby, riscaldamento del carter e spento (si faccia riferimento alla norma), P_{TO}, P_{SB}, P_{CK}, P_{OFF} rappresentano rispettivamente le potenze elettriche misurate nelle modalità termostato spento, standby, riscaldamento del carter e spento, Q_H e Q_C sono rispettivamente le potenze termiche di riscaldamento e raffrescamento richieste dall'utenza (ipotizzate seguendo l'esempio presente sulla norma di riferimento), mentre $SCOP_{ON}$ e $SEER_{ON}$ indicano rispettivamente i coefficienti di prestazione stagionale nelle sole modalità attive, in regime invernale ed estivo.

In definitiva, per il prototipo elaborante l'R134a risulta un valore del TEWI pari a 10001 kg CO_2 equivalenti per l'intero ciclo di vita di 7 anni della macchina (pari a 1428 kg di CO_2 equivalenti per ogni anno di utilizzo) mentre per il prototipo elaborante propano il valore del TEWI risulta pari a 7519 kg CO_2 equivalenti per l'intero ciclo di vita di 7 anni della macchina (pari a 1074 kg di CO_2 equivalenti per ogni anno di utilizzo).

In definitiva, nell'ambito delle condizioni operative previste dalla norma per i test su macchine a compressione di vapore aria-acqua in climi medi, il contributo al TEWI legato all'effetto indiretto è quasi uguale per entrambi i fluidi, mentre in termini di contributo diretto è evidente il vantaggio del fluido propano sia per la riduzione del GWP che per le minori immissione dirette in ambiente mitigate dalla maggiore cura nella realizzazione degli impianti per fluidi infiammabili. I risultati presentati rimangono strettamente legati alle condizioni operative considerate e alle ipotesi fatte per l'utenza, il clima e le perdite dirette in atmosfera.

Conclusioni

L'attività ha riguardato il test di due prototipi di pompe di calore reversibili utilizzanti due refrigeranti diversi, l'R134a e l'R290. I due prototipi sono caratterizzati da componenti e circuitazione uguale, a parte il compressore. La matrice di prova è stata determinata in accordo alla normativa vigente sui test per le pompe di calore (UNI EN 14511 parte 2 e parte 3 ed UNI EN 14825:2013). L'elaborazione dei dati ha consentito di calcolare gli indici prestazionali stagionali (SCOP e SEER). Dal confronto degli indici di prestazione invernale (SCOP) si nota che essi sono all'incirca uguali per i due fluidi, con una prestazione leggermente migliore del R134a a basse temperature e del propano a temperature più elevate. Invece, in termini di indici di prestazione estiva (SEER) il propano dimostra di essere più vantaggioso del R134a con valori dell'EER mediamente più alti fino al 27%.

Per quanto riguarda la valutazione del TEWI è evidente il vantaggio del fluido propano sia per la riduzione del GWP che per le minori immissione dirette in ambiente mitigate dalla maggiore cura nella realizzazione degli impianti per fluidi infiammabili.

I risultati sono documentati e dettagliati nei rapporti RdS/PAR2013/164 e RdS/PAR2013/165.

c.2 Radiatori di nuova generazione ad elevato salto termico in accoppiamento a sistemi di pompa di calore elettrica

L'attività di ricerca svolta ha avuto lo scopo di valutare il comportamento di una pompa di calore a CO_2 (R744) abbinata a radiatori ad elevato salto termico in funzione del sistema di regolazione installato sui terminali d'impianto: valvole termostatiche tradizionali e valvole elettroniche modulanti. Le prove sperimentali sono state condotte da ENEA su una pompa di calore a CO_2 del tipo aria-acqua installata presso il laboratorio UTTEI-TERM. L'attività di ricerca ha visto la fornitura da parte dell'azienda IRSAP, leader nel settore dei radiatori, dei termosifoni, delle valvole termostatiche classiche e delle valvole elettroniche modulanti denominate NOW. Le prove sperimentali sono state articolate in base al sistema di regolazione installato sui radiatori allo scopo di confrontare le prestazioni del gas cooler (scambiatore CO_2-acqua) ottenute in presenza di valvole termostatiche classiche con quelle ottenute in presenza di valvole elettroniche modulanti. Le prove con valvole termostatiche classiche hanno permesso di determinare le condizioni limite in termini di portata d'acqua da inviare al gas cooler per mantenere l'efficienza di tale scambiatore a valori maggiori o uguali all'unità. Le prove con valvole elettroniche modulanti hanno permesso di testarne la capacità di modulare la portata d'acqua e di individuare le migliorie da apportare in termini impiantistici e di logica di regolazione per l'abbinamento con pompe di calore a CO_2.

Gli impianti a radiatori esistenti sono numerosi e difficilmente possono essere sostituiti se non con ristrutturazioni consistenti. La soluzione migliore in assoluto è l'abbinamento tra pompe di calore e radiatori adottando necessariamente innovativi sistemi di regolazione elettronica allo scopo di massimizzare le prestazioni della macchina. Le pompe di calore a CO_2, oltre ad utilizzare un refrigerante a basso impatto ambientale (GWP_{100}=1 e ODP=0) sono particolarmente adatte al revamping di impianti di riscaldamento con caldaie abbinate a radiatori in quanto esse sono in grado di produrre acqua ad alta temperatura, oltre 70 °C, con prestazioni molto elevate a patto di mantenere la temperatura dell'acqua di ritorno al gas cooler a livelli piuttosto bassi, dell'ordine dei 30 °C. Questo ultimo aspetto richiede lo sviluppo di un opportuno sistema di regolazione come le valvole termostatiche elettroniche modulanti testate nel presente lavoro. A differenza delle valvole elettroniche modulanti, le valvole termostatiche tradizionali non riescono a modulare in continuazione la portata d'acqua, ma lavorano con cicli di apertura e chiusura.

La curva di potenza di un radiatore in funzione della portata è fortemente non lineare per progettazione con salti termici bassi e quindi non è molto adatta per permettere ad una valvola di regolazione termostatica di regolare in modulazione con sufficiente precisione: è il motivo per cui molto spesso le valvole termostatiche tendono a lavorare in modalità on-off (Figura 485). Decisamente meglio si comportano le nuove valvole di regolazione elettroniche che permettono un controllo più raffinato. La curva di potenza tende a divenire tanto più lineare quanto più aumenta il salto termico di progetto. La curva è completamente lineare quando la temperatura dell'acqua in uscita si avvicina alla temperatura dell'aria ambiente, qualunque sia la temperatura di produzione, permettendo una regolazione migliore dell'intero sistema.

L'andamento on-off delle valvole termostatiche si sposa male con l'ottimizzazione energetica di tutti i generatori, perché sottrae contenuto d'acqua utile all'impianto e, di conseguenza, diminuisce l'inerzia disponibile. Il numero di avviamenti di un generatore tende infatti ad aumentare con decadimento del proprio rendimento.

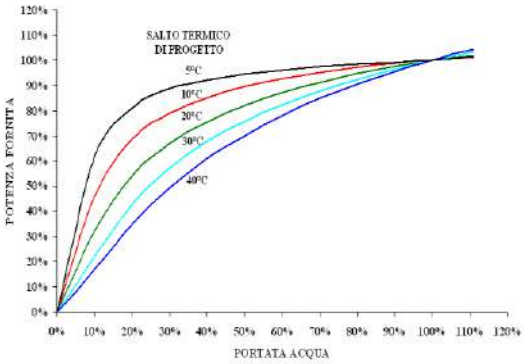


Figura 485. Variazione di potenza resa da un radiatore al variare del salto termico di progetto alle condizioni nominali, valida T_{H2O} in ingresso 75°C

Il mantenimento di una costanza di portata è molto importante perché fa si che:

- la temperatura dell'acqua di ritorno sia più bassa;
- il contenuto d'acqua nell'impianto sia sempre ottimale;
- il generatore lavori con maggior regolarità senza continui interventi di accensione e spegnimento.

Questi aspetti sono importanti con qualunque generatore, ma diventano fondamentali con le pompe di calore, in particolar modo con quelle che utilizzano l'anidride carbonica (CO_2) come refrigerante.

L'esecuzione dei test sperimentali è stata effettuata mediante un'apposita facility di prova costituita da una pompa di calore a CO_2 e da radiatori in acciaio ad elevato salto termico sui quali sono state installate le due diverse tipologie di sistemi di regolazione. La facility ha permesso di lavorare in condizioni prefissate per quanto concerne la temperatura dell'aria in ingresso all'evaporatore della macchina. Le prove sono state eseguite a diverse temperature aria esterna, variando la portata e la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler con lo scopo di determinare le condizioni limite in termini di portata d'acqua al di sotto della quale l'efficienza del gas cooler risulta inferiore all'unità. Le prestazioni dello scambiatore di alta pressione sono state determinate in funzione del sistema di regolazione utilizzato.

La facility di prova utilizzata è costituita dai seguenti componenti: pompa di calore a CO_2 aria-acqua di capacità termica pari a 4,5 kW (Figura 486), tre radiatori multi colonna tubolare in acciaio, connessi in parallelo, sistema di regolazione dei radiatori, sistema di monitoraggio ed acquisizione. I principali componenti della macchina (Figura 487) sono: compressore rotativo bistadio, silenziatore (Muffler), pressostato (Psr), scambiatore di calore ad acqua del tipo tubo in tubo, valvola elettronica di espansione (EEV), il cui grado di apertura può essere gestito mediante un modulo ARDUINO, scambiatore di calore ad aria a pacco alettato.

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 CO_2 in condizioni di esercizio in corrispondenza (ingresso/uscita) dei principali componenti.



Figura 486. Facility di prova con pompa di calore a CO_2 abbinata a radiatori ad elevato salto termico

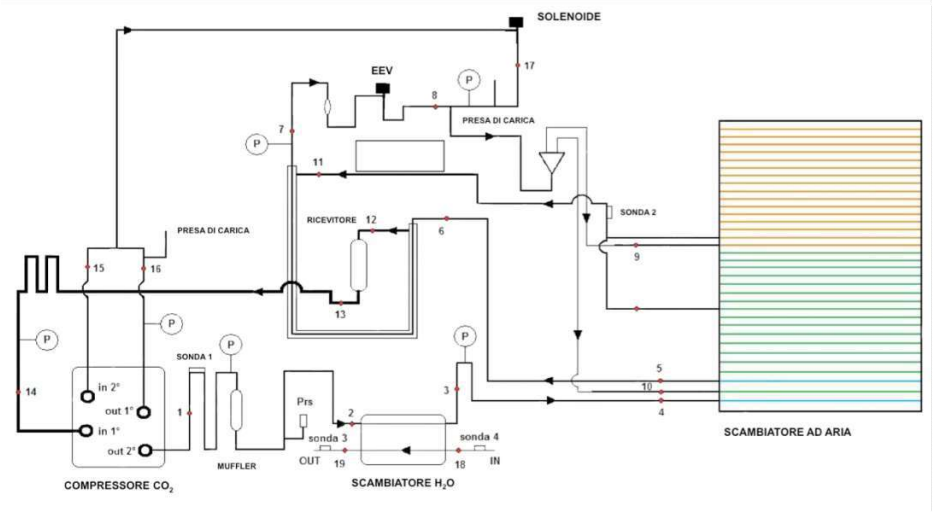


Figura 487. Schema d'impianto della pompa di calore strumentata

Le valvole termostatiche tradizionali utilizzate (Figura 488) presentano una testa termostatica con termostato ad espansione di liquido (campo di regolazione da 6,5 a 28°C, isteresi di 0,5 K, tempo di risposta di 10 minuti). Le valvole elettroniche utilizzate lavorano con algoritmi appositamente studiati per i singoli radiatori rendendole in grado di abbinarsi ad ogni singolo radiatore in quanto su di esse vengono memorizzate tutte le caratteristiche del terminale.



(a) (b) (c)

Figura 488. Valvola a testa termostatica tradizionale del tipo on/off (a), Valvole termostatiche elettroniche modulanti con centralina Wi-Fi di regolazione (b,c)

Il monitoraggio e l'acquisizione dei dati sperimentali sono stati effettuati mediante un programma opportunamente sviluppato in ambiente LabVIEW (Figura 489). I valori di temperatura e di pressione acquisiti consentono inoltre di visualizzare in tempo reale sul diagramma p-h il ciclo svolto dalla CO_2 al variare delle condizioni al contorno.

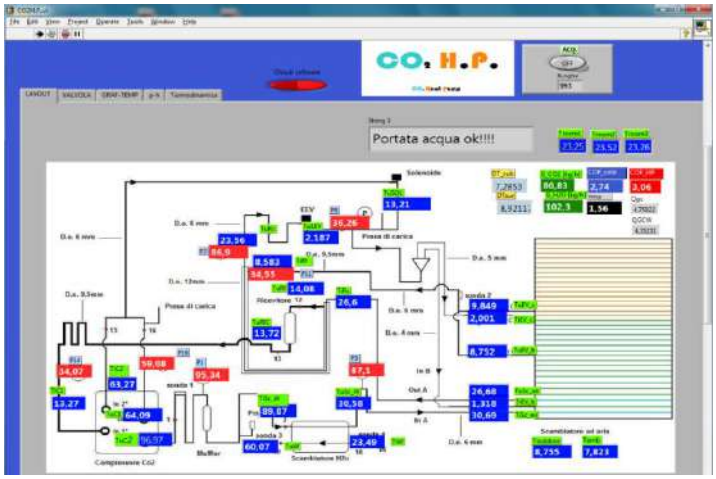


Figura 489. Schermata del front panel del sistema di acquisizione dati

Modalità esecuzione delle prove sperimentali

Le prove sono state eseguite variando il sistema di regolazione installato sui radiatori (valvole termostatiche tradizionali e valvole elettroniche modulanti). La macchina può funzionare in due differenti modalità: standard o non standard a seconda se si interviene al fine di variare la frequenza di alimentazione del compressore.

Prove con valvole termostatiche tradizionali

Sono state eseguite prove a temperatura ambiente variabile con macchina in configurazione standard allo scopo di determinare le condizioni limite in termini di portata d'acqua al gas cooler e di temperatura massima di mandata dell'acqua. Dall'elaborazione di tali prove si evince che a parità di temperatura dell'acqua entrante al gas cooler e dell'aria in ingresso all'evaporatore, una portata d'acqua maggiore garantisce un COP ed un'efficienza del gas cooler εgc maggiori. Lo scambiatore di calore refrigerante-acqua lavora meglio con portate dell'acqua maggiori. L'εgc raggiunge valori prossimi o maggiori all'unità per portate d'acqua maggiori di 230 kg/h.

Per raggiungere alte temperature di mandata è stato necessario far lavorare la pompa di calore in configurazione non standard. I dati sperimentali successivamente riportati sono stati riorganizzati in funzione della temperatura dell'acqua di mandata all'impianto rispettivamente pari a 40, 50 e 60 °C. I risultati sono stati analizzati in funzione delle condizioni di lavoro al gas cooler cioè in base alla portata d'acqua ed alla differenza di temperatura sul lato freddo dello scambiatore di calore (ΔTcool gc). I test sono stati effettuati in due modalità cioè al variare della potenza termica erogata dalla pompa di calore fissando la temperatura dell'acqua di mandata e ad una temperatura dell'aria esterna di 7 °C fissando sempre la temperatura dell'acqua di mandata. La temperatura di 40 °C in uscita alla macchina si ottiene con valori di portata intorno a 300 kg/h, valore di portata d'acqua elevato che consente di ottenere alte prestazioni sia per quanto riguarda il COP della macchina, che si attesta a valori intorno a 3, e sia per quanto concerne il gas cooler. Nelle prove effettuate con una temperatura dell'acqua di mandata di 50°C è risultato che per portate intorno a 200 kg/h si ha un COP variabile tra 2,8 e 3 mentre in configurazione standard la macchina lavora con portate inferiori corrispondenti ad un funzionamento del gas cooler peggiore. Nel primo caso, portata d'acqua intorno a 200 kg/h, l'εgc si attesta a valori unitari con ΔTcool gc nullo. Quando si ha una temperatura dell'acqua di mandata di 50°C il gas cooler lavora bene per portate dell'acqua maggiori di 160 kg/h (Figure 490 e 491).

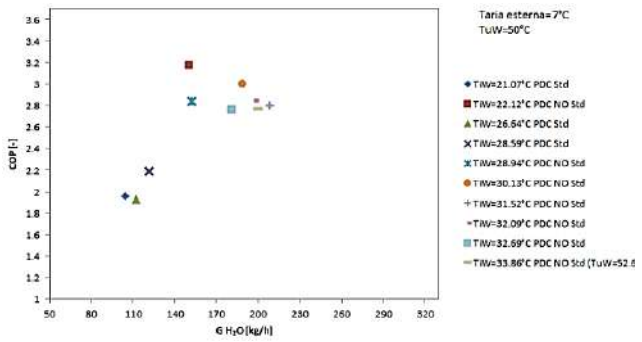


Figura 490. COP della macchina al variare della portata d'acqua

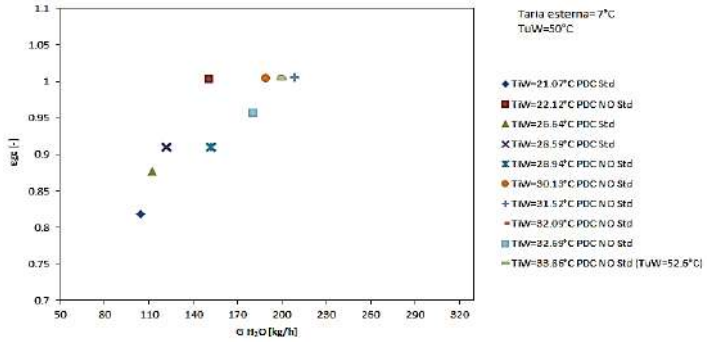


Figura 491. Efficienza del gas cooler in funzione della portata d'acqua con temperatura ambiente variabile

Nelle prove con temperatura dell'acqua di mandata fissata a 60°C, le portate dell'acqua sono minori rispetto ai casi precedenti, attestandosi tra i 60 e i 120 kg/h (Figure 492 e 493). Per portate molto basse intorno ai 60 kg/h, in modalità standard, è stato rilevato un COP pari a 1,8 ed un'εgc inferiore rispetto alla modalità non standard. In questo caso la situazione è migliore in quanto si ha un COP che varia tra 2,2 e 3,2 ed anche l'εgc tende a riportarsi a valori prossimi all'unità. Le portate molto basse ed una temperatura di uscita dalla macchina così elevata determinano che ΔTcool gc non è mai nullo nonostante la temperatura dell'acqua di ingresso presenti valori confrontabili con il caso di temperatura dell'acqua in uscita pari a 50°C.

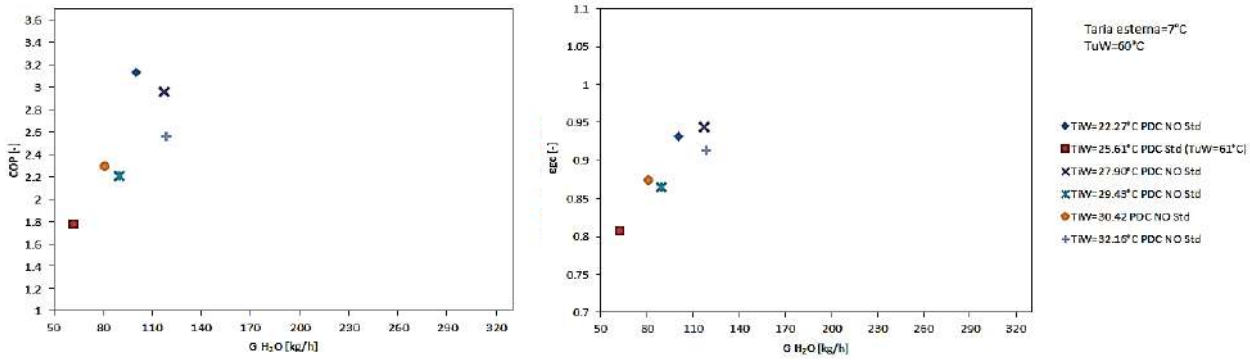


Figura 492. COP della macchina e efficienza del gas cooler in funzione della portata d'acqua

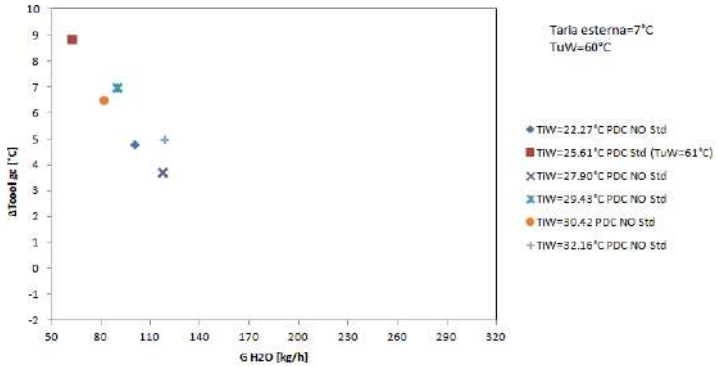


Figura 493. Differenza di temperatura lato freddo del GC tra CO_2 e H_2O in funzione della portata erogata

Prove con valvole termostatiche elettroniche modulanti

Il gas cooler della pompa di calore utilizzata per i test è ottimizzato per una portata ben superiore a quella richiesta per il corretto dimensionamento di un impianto. È stato ritenuto del tutto inutile ripetere le prove con le stesse modalità di quelle effettuate con le valvole termostatiche, perché avrebbero dato risultati simili. Si è verificata la possibilità di mantenere costante la portata in ingresso al gas cooler, pur variando il set point delle valvole (quindi il carico in ambiente) e la temperatura di produzione. La Figura 495 mostra l'andamento della portata d'acqua, della temperatura di uscita dalla pompa di calore (set a TuW=60°C) e della temperatura d'ingresso.

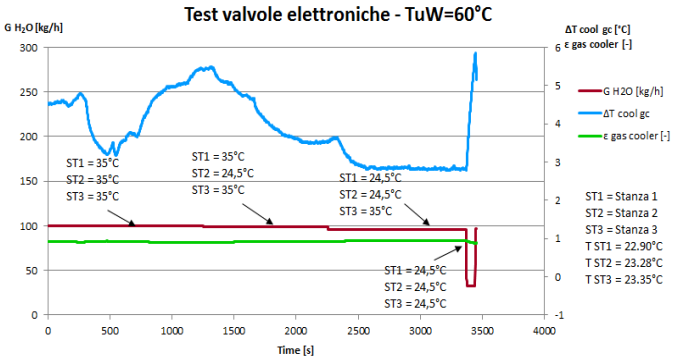


Figura 494. Valvole elettroniche: prova a 60°C

Nel digramma di Figura 496 vengono riportati l'andamento della portata d'acqua, l'efficienza del gas cooler e la differenza tra la temperatura di uscita del gas e la temperatura di ingresso dell'acqua (ΔT cool gc). Con le frecce si mostrano i momenti in cui sono stati variati i set point della temperatura ambiente della stanza associata a ciascun radiatore (ST1, ST2 e ST3). Come si vede, la portata d'acqua e l'efficienza del gas cooler sono sostanzialmente stabili, mentre il ΔT cool gc non è né costante e né tantomeno basso. Tuttavia si ritiene che questa condizione dipenda dal fatto che il gas cooler è ottimizzato per un funzionamento del tutto diverso da quello a cui è stato sottoposto.

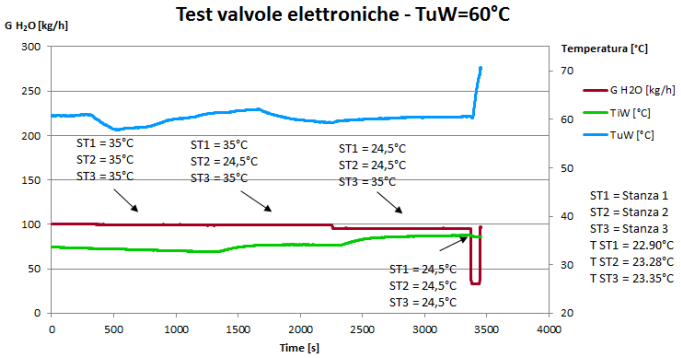


Figura 495. Valvole elettroniche: prova a 60°C

Le Figure 497 e 498 mostrano le prove a 50°C e a 40°C. Come si può notare, a 50°C il ΔTcool gc si mantiene costante almeno in condizione statiche, mentre varia al variare del set point impostato sulle valvole. Ciò avviene perché la portata d'acqua ottimale nel gas cooler è superiore, più vicina alle condizioni di ottimo. Ciò è confermato anche nella prima parte della prova a 40°C, con portata dell'acqua ottimale ancora superiore: la perdita del controllo si ha solamente quando tutte le valvole lavorano con un set point molto basso e la potenza richiesta tende a 0 kW. Le prove confermano quanto detto in precedenza: la pompa di calore testata non è adatta a lavorare con una variazione di portata troppo elevata, perché il suo gas cooler non è ottimizzato per questo tipo di funzionamento.

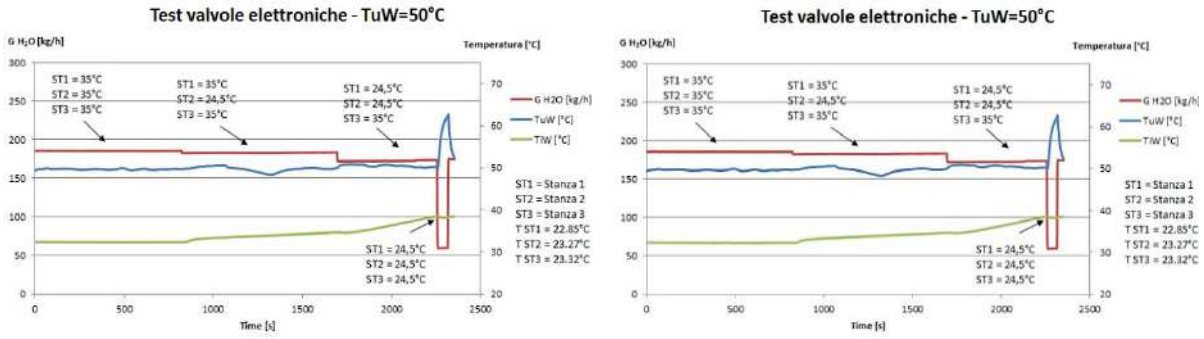


Figura 496. Valvole elettroniche: prova a 50°C

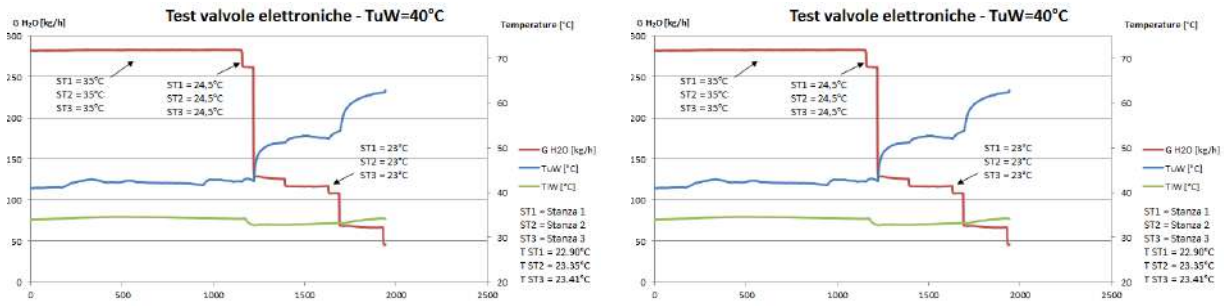


Figura 497. Valvole elettroniche: prova a 40°C

Da notare che le prove sono state effettuate a carico costante, a meno della variazione minima prodotta dal cambiamento di set point: le prove a 50 ed a 40°C sono risultate più corrette di quella a 60°C caratterizzata da una difformità tra la potenza richiesta e la temperatura di produzione. La scelta è stata fatta di proposito, proprio per vedere le conseguenza di un accoppiamento non perfetto tra temperatura di produzione e portata dell'acqua nel gas cooler. Con una pompa di calore opportunamente dimensionata i valori sarebbero risultati ottimali in ogni condizione di funzionamento. Infatti, importante è stata la verifica della possibilità di ottenere una curva di portata complessiva poco variabile, in modo da lavorare sempre nelle condizioni di massima stabilità della macchina. Questo non può avvenire con le valvole termostatiche tradizionali, a causa dei cicli di funzionamento in continua apertura e chiusura, mentre le valvole termostatiche elettroniche sono in grado di modulare continuamente la portata d'acqua nel modo più corretto.

Potenzialità ed evoluzione della tecnologia pompa di calore a CO_2 abbinata a radiatori

Le pompe di calore a CO_2 sono fortemente influenzate dalla temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler e quindi non possono essere connesse ad un circuito a portata costante, perché altrimenti la temperatura di ingresso aumenterebbe al diminuire del carico. E' quanto accade se si utilizza una pompa di calore a CO_2 in un impianto a radiatori senza valvole, regolato solamente da termostati ambiente: la portata d'acqua rimane costante, per cui il salto termico diminuisce al diminuire della potenza richiesta. Di conseguenza si alza la temperatura d'ingresso al gas cooler.

Per aumentare l'efficienza energetica, bisogna necessariamente collegarle ad un circuito a portata variabile (Figura 499). Questa scelta comporta ulteriori problemi perché, come si è visto, l'efficienza di scambio del gas-cooler della macchina utilizzata è ottimale solamente in un certo campo di portate. E' possibile pensare a macchine studiate appositamente per gli impianti di riscaldamento, con soluzioni idonee ad allargare il campo di portate d'acqua ottimali (ad esempio utilizzando più gas cooler in parallelo, intercettabili sia dal lato frigorifero che idraulico): tuttavia le oscillazioni di portata devono essere abbastanza limitate, se si vogliono ottenere delle prestazioni elevate.

Da questo punto di vista le valvole termostatiche tradizionali si comportano molto male, perché lavorano con cicli continui di apertura e chiusura e quindi ampie e continue variazioni di portata d'acqua. Molto meglio si comportano le valvole elettroniche, soprattutto se la logica di controllo viene opportunamente modificata. Agli algoritmi personalizzati per singolo radiatore ed alla capacità di dialogare con il generatore in modo da indicare la temperatura di produzione più idonea, devono essere aggiunte ulteriori funzioni come la capacità di controllare anche la temperatura di uscita, mentre l'intero sistema deve calcolare la portata di ritorno ed adattare la temperatura di mandata in modo che il campo di variazione di portata sia limitato.

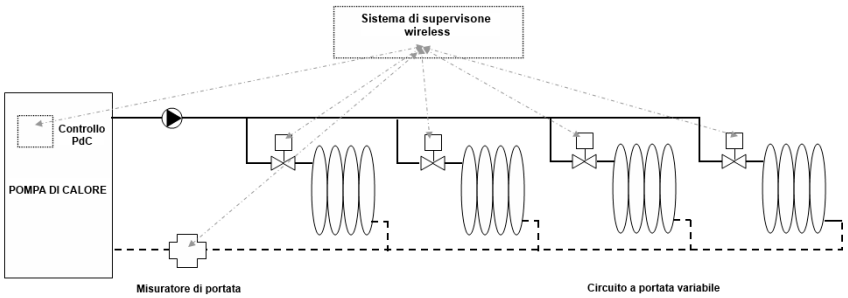


Figura 498. Collegamento tra una pompa di calore a CO_2 collegata ad uni impianto a radiatori con valvole elettroniche

Come si può notare, il sistema di supervisione wireless dialoga anche con un misuratore di portata d'acqua posto all'ingresso della pompa di calore e del relativo gas cooler. La logica di funzionamento deve essere tale per cui la temperatura dell'acqua prodotta deve essere fissata in base sia all'apertura delle valvole sia alla portata complessiva nel gas cooler, in modo da ottimizzare il COP di funzionamento. L'impianto va calcolato con un elevato salto termico (ad esempio 48°C, 70°C in ingresso ai radiatori e 22°C in uscita) così da linearizzare al massimo la potenza resa in funzione della portata, per facilitare la regolazione da parte delle valvole elettroniche.

Da alcune simulazioni effettuate su un appartamento dotato di impianto con pompa di calore a CO_2 abbinata a radiatori è risultato che, rispetto alle valvole termostatiche, le valvole elettroniche sono in grado di mantenere la temperatura media dell'acqua in ingresso al gas cooler a valori costanti e prossimi alla temperatura dell'aria ambiente. Anche la temperatura dell'acqua prodotta dalla pompa di calore è più bassa nel caso di valvole elettroniche (a patto che la logica di gestione sia opportunamente studiata). Infine, il numero di avviamenti della pompa di calore va raramente a 0 e nelle migliore delle ipotesi si ferma a 1 nel caso di valvole elettroniche, determinando un COP sempre maggiore rispetto all'uso di valvole termostatiche tradizionali grazie alla minor temperatura di produzione, al minor numero di avviamenti orari e all'ottimizzazione delle portate d'acqua all'interno del gas cooler. Dalle simulazioni effettuate, nel confronto tra pompe di calore tradizionali e pompe di calore a CO_2 queste ultime hanno un COP maggiore quando la temperatura dell'aria esterna è inferiore a circa 5°C risultando particolarmente adatte ai climi freddi. Tuttavia, anche in climi più caldi hanno il vantaggio di lavorare con portate d'acqua molto inferiori, perché possono sfruttare un elevato salto termico: questo le favorisce nel caso di ristrutturazioni perché i diametri delle tubazioni sono molto inferiori a quelli richiesti da macchine tradizionali. Anche nel nuovo, comunque, sfruttano il beneficio energetico di ridurre di molto le spese di pompaggio. I consumi elettrici sopra considerati riguardano solamente la spesa per muovere il compressore e i ventilatori delle pompe di calore, non quella per il pompeggio. Se si aggiungesse anche questa, il bilancio sarebbe favorevole alle macchine a CO_2.

Conclusioni

Le pompe di calore a CO_2 potrebbero essere dei generatori particolarmente adatti in abbinamento ad impianti di riscaldamento a radiatori con elevato salto termico. Il condizionale è d'obbligo perché attualmente gli unici modelli presenti sul mercato sono quelli studiati per la produzione di acqua calda sanitaria. Il motivo è semplice: lavorando in un ciclo transcritico, le prestazioni delle pompe di calore a CO_2 sono sufficientemente elevate, dal punto di vista energetico, solamente se la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler è sufficientemente bassa, inferiore a 30°C.

Attualmente si ritiene difficile che gli impianti di riscaldamento, soprattutto quelli a radiatori, possano lavorare con temperature dell'acqua di ritorno al generatore così basse. La ricerca ha dimostrato che non è vero: un corretto dimensionamento dei radiatori e dell'impianto permette una temperatura dell'acqua di ritorno solo di un paio di gradi superiore alla temperatura dell'aria ambiente, anche nelle condizioni di pieno carico. Per la buona riuscita del progetto, però, bisogna porre particolare attenzione su diversi aspetti.

Innanzitutto i radiatori devono avere un elevato contenuto d'acqua, pari ad almeno 10-15 L/kW di potenza nominale (alle condizioni di funzionamento massimo) in modo da permettere lente variazioni del profilo di temperatura al loro interno, assicurare all'impianto un'inerzia tale da permettere al compressore della pompa di calore pochi avviamenti, assicurare in tutte le condizioni una temperatura dell'acqua in uscita prossima a quella della temperatura dell'aria, permettere una buona regolazione mediante l'uso di valvole termostatiche elettroniche. Da questo punto di vista si può affermare che i radiatori ad alto contenuto d'acqua sono i migliori terminali in assoluto per le pompe di calore a CO_2, nettamente migliori dei sistemi radianti che scontano anche il fatto di non lavorare sotto portata costante.

Quest'ultimo aspetto è fondamentale: una temperatura dell'acqua di ritorno dai terminali, quindi in ingresso al gas cooler, sufficientemente bassa si può ottenere solo con un circuito a portata d'acqua variabile, con una regolazione che permetta una modulazione continua.

Impianti con regolazione on off, come quelli dotati di termostato ambiente con qualunque terminale, oppure sistemi radianti necessariamente dotati di valvole di regolazione on off, fanno aumentare la temperatura di uscita dai terminali al diminuire del fabbisogno termico dei locali, penalizzando in questo modo l'efficienza energetica delle pompe di calore a CO_2.

Anche le tradizionali valvole termostatiche impiegate nei radiatori non sono per nulla adatte all'accoppiamento con pompe di calore a CO_2, a causa dei loro cicli continui di apertura e chiusura. Questi provocano due problematiche distinte: da un lato la portata d'acqua al gas cooler non è mai costante, dall'altro la temperatura

dell'acqua in uscita ai terminali non è mai ottimale. Le pompe di calore a CO_2 hanno pertanto bisogno di organi di regolazione appositamente studiati, dotati di assoluta precisione. Le valvole elettroniche utilizzate nei test hanno dimostrato le seguenti caratteristiche: la precisione nel controllo della temperatura ambiente è molto buona, con una regolazione continua che permette l'afflusso idoneo e costante della corretta portata d'acqua. Durante la ricerca, sono stati sviluppati nuovi algoritmi per migliorarne il controllo. Le valvole hanno la capacità di prevedere e anticipare le prestazioni dei radiatori, in quanto ciascuna conosce le curve prestazionali del modello di radiatore cui è collegata. Pertanto sono in grado di assicurare al generatore una temperatura dell'acqua di produzione ottimale. Questa funzione è sufficiente nel caso di pompe di calore tradizionali, ma non per le pompe di calore a CO_2 che sono molto influenzate sia dalla temperatura di ingresso che dalla portata d'acqua nel gas cooler. Il sistema di regolazione con valvole elettroniche permette di controllare ed ottimizzare anche questi parametri, oltre alla temperatura dell'aria in ambiente ed alla temperatura di produzione dell'acqua da inviare all'impianto. Questo aspetto è risultato fondamentale per il raggiungimento di una sufficiente efficienza energetica.

In ultimo è giusto segnalare come sia necessario studiare delle pompe di calore a CO_2 adatte all'utilizzo negli impianti di riscaldamento con radiatori ad elevato salto termico. La macchina testata non soddisfa queste caratteristiche, in quanto è pensata solo ed esclusivamente per la produzione dell'acqua calda sanitaria. In particolare, il gas cooler è dimensionato per tale scopo, con portate d'acqua ottimali troppo elevate per un impianto con elevato salto termico. Una pompa di calore a CO_2 ottimizzata per un impianto di riscaldamento dovrebbe funzionare con portate d'acqua sufficientemente bassa, cosa che richiederebbe un sostanziale ripensamento del gas cooler e probabilmente l'adozione di soluzioni particolari, come due scambiatori in parallelo, per essere ottimizzata in ogni condizione di funzionamento. Questo garantirebbe di sicuro le prestazioni stimate nella simulazione dinamica.

L'utilizzo delle pompe di calore a CO_2 con radiatori ad elevato salto termico permetterebbe di ridurre al massimo le spese di pompaggio dell'acqua circolante nell'impianto, perché la portata sarebbe almeno 5 volte inferiore a quella di un normale impianto a radiatori. Inoltre, il diametro delle tubazioni sarebbe molto limitato, cosa decisamente utile nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti, il vero mercato del futuro. Quindi, sarebbero particolarmente adatte sia ai nuovi edifici a consumo energetico quasi zero (NZEB), sia alla ristrutturazione del patrimonio edilizio nazionale.

Inoltre, le prestazioni delle pompe di calore a CO_2 sono nettamente migliori di quelle delle pompe di calore tradizionali per temperature dell'aria esterna basse. Ciò significa un minor impegno di potenza ed un minor consumo di energia nelle condizioni più critiche, ovvero all'avviamento mattutino. E' un vantaggio notevole per la rete di distribuzione dell'energia elettrica del nostro paese, perché la massima riduzione di energia si avrebbe proprio nei momenti in cui le pompe di calore tradizionali richiederebbero consumi elevati, con maggiore stress per il nostro sistema elettrico.

I risultati dell'attività sono documentati e dettagliati nel rapporto RdS/PAR2013/166.

d. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali e comunicazione e diffusione dei risultati

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

L'ENEA ha assicurato la partecipazione, quali rappresentanti italiani nell'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".

IEA SHC Task 48 "Quality assurance and support measures for Solar Cooling"

Il lavoro si è concentrato prevalentemente nell'ambito del Subtask A2 "Life cycle analysis at component level" e Subtask B3 "Life cycle analysis at system level" di cui Università di Palermo (Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici, DEIM) è leader.

La Subtask A2 ha come obiettivo l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) per la valutazione delle prestazioni energetico-ambientali di materiali e componenti dei sistemi di solar heating and cooling. In dettaglio, è stato svolto uno studio di LCA per il chiller Pink PC19 e sono stati aggiornati gli inventari di ciclo di vita, già realizzati nell'ambito della Task 38 dell'IEA, di due chiller ad assorbimento (PINK PSC-10 con H_2O/NH_3 e SorTech AG ACS 08 con H_2O/Silica Gel) e di altri componenti dell'impianto di solar heating and cooling (ad es. collettori solari termici, pompe, caldaia a gas, ecc.). I risultati ottenuti sono stati utilizzati per la compilazione di schede di

sintesi che hanno consentito di realizzare un database di inventari di ciclo di vita e di impatti energetico-ambientali di materiali e componenti dei sistemi di solar heating and cooling.

La Subtask B ha come obiettivo lo sviluppo di uno strumento di calcolo per LCA da utilizzare per la stima delle prestazioni energetico-ambientali e di indici di payback energetico-ambientali di differenti sistemi di solar heating and cooling.

Il tool, sviluppato in formato .xls, contiene i risultati degli studi di LCA condotti nell'ambito della Task 38 e della Task 48 - Subtask A2 e rappresenta uno strumento utile e di semplice utilizzo per lo sviluppo di studi di LCA semplificati applicati ad impianti di solar heating and cooling localizzati in differenti contesti geografici. In particolare, il tool consente di calcolare i seguenti indici di prestazione energetico-ambientale e di payback:

- Global Warming Potential (GWP);
- Primary Energy consumption (PE);
- Energy Payback Time (EPT);
- GWP Payback Time (GWP-PT);
- Energy Return Ratio (ERR).

Inoltre, è possibile valutare:

- le fasi del ciclo di vita del sistema di solar heating and cooling responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali;
- i componenti responsabili dei maggiori impatti energetico-ambientali, per la fase di produzione del sistema;
- gli impatti energetico-ambientali di un sistema convenzionale che svolge la stessa funzione del sistema di solar heating and cooling;
- l'impatto evitato grazie all'utilizzo del sistema di solar heating and cooling in sostituzione di un sistema convenzionale.

IEA SHC Task 53 "New generation solar cooling & heating systems"

I risultati del IEA SHC Task 38 "Solar Air-Conditioning and Refrigeration" e dell'attuale IEA SHC Task 48 "Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling Systems" hanno mostrato da una parte un grande potenziale della tecnologia per il condizionamento degli edifici, specie nelle regioni calde e soleggiate. D'altra parte hanno confermato che è necessario ulteriore lavoro per raggiungere una competitività economica usando non solo la fonte solare termica ma anche quella fotovoltaica. Nel Task Definition Workshop si è concordata la struttura del task "New generation solar cooling & heating systems" (PV and solar thermal driven cooling & heating systems). Un forte interesse verso una nuova generazione di sistemi di solar cooling associati alla generazione da fotovoltaico deriva dalla notevole espansione di quest'ultima tecnologia. L'accoppiamento della tecnologia PV a quella delle macchine frigo a compressione potrebbe portare a significative riduzioni dei costi dei sistemi di solar cooling. Tuttavia questa reale integrazione è ancora ai primi passi. E' necessario ad esempio verificare prestazioni e caratteristiche di inverter, pompe di calore, compressori e ottimizzare la gestione annuale dell'intero sistema.

Sono, inoltre, di particolare interesse i sistemi cosiddetti ibridi in cui la fonte solare è utilizzata sia termicamente che elettricamente. Il task ha quindi lo scopo di:

- analizzare l'interesse verso una nuova generazione di solar cooling and heating "concepts" (sia PV, che termici che ibridi), selezionare le migliori soluzioni che portino a sistemi altamente affidabili, durevoli, efficienti e robusti;
- contribuire all'ingresso nel mercato di una nuova generazione di sistemi e di identificare i mercati più promettenti in termini di competitività del costo dell'energia elettrica.

Il lavoro si articola in quattro Subtask:

- Subtask A: Components, Systems & Quality
  - A1: Reference systems
  - A2: New system configurations for cooling and heating
  - A3: Storage concepts and management
  - A4: Systems integration into buildings, microgrid and central Grid
  - A5: LCA and techno-eco comparison between reference and new systems
- Subtask B: Control, Simulation & Design
  - B1: Reference conditions
  - B2: Grid access conditions and building load management analysis
  - B3: Models of subcomponents and system simulation

- B4: Control strategy analysis and optimization for ST and PV
- B5: System inter-comparison

- Subtask C: Testing and demonstration projects
  - C1: Monitoring procedure and monitoring system selection criteria
  - C2: System description for field test and demo project
  - C3: Monitoring data analysis on technical issues & on performances
  - C4: Best practices / feedback
  - C5: Testing method initiation for standards
- Subtask D: Dissemination and market deployment
  - D1: Website dedicated to the Task
  - D2: Handbook and simplified brochure
  - D3: Newsletters, workshops and conferences
  - D4: Road mapping and lobbying actions.

Il gruppo DEIM dell'Università di Palermo ha in carico la leadership dell'attività *A5* "LCA and techno-eco comparison between reference and new systems". Questa attività si concentra sul confronto fra tutti i sistemi studiati nell'ambito del subtask A e dei sistemi di riferimento. Tali confronti saranno svolti mediante la metodologia del Life Cycle Analysis e su una base tecnico-economica. Adeguati indicatori di prestazione saranno calcolati e selezionati dalla letteratura e dalla esperienza pratica degli esperti del Task e dai players industriali.

DEIM sarà inoltre coinvolta nelle Subtask C2 "System description for field test and demo project" e C3 "Monitoring data analysis on technical issues & on performances". I lavori sono iniziati in primavera 2014 ed hanno riguardato la preparazione di una agenda dettagliata delle attività la quale sarà discussa ad ottobre 2014.

IEA SHC Task 42-Annex 24 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration"

La programmazione dei lavori della Task 42/24, iniziati nel febbraio del 2009, sono stati prolungati fino al 2015. La partecipazione del DEIM dell'Università di Palermo ai lavori del Task 42 IEA SHC 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 del Task 42. Durante l'ultimo meeting tenutosi a Freiburg (Germania), presso il Fraunhofer-Institut für Solare Energie Systeme ISE, il DEIM ha presentato 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 sulla copertura del DEIM di Palermo.

La relazione scientifica del lavoro "Heat storage system coupled with a photovoltaic panel (M. Cellura, G. Ciulla, V. Lo Brano) è stata inserita nel report ufficiale della IEA Task 42 in fase di pubblicazione.

Nell'ultimo anno il gruppo di ricerca del DEIM si è impegnato nello studio, analisi e verifica della correttezza dei risultati ottenuti confrontandoli con alcune soluzioni analitiche largamente impiegate nella bibliografia di settore. Inoltre è in fase di test un algoritmo che descrive il bilancio termico del sistema PV-PCM basato sul metodo di Crank-Nicolson per ottimizzare i vantaggi offerti dal metodo esplicito con quelli offerti dal metodo implicito. La continuazione del programma di ricerca e la partecipazione ai prossimi meeting della Task 42 permetterà al gruppo del DEIM di collaborare con gli altri partecipanti al fine di una possibile integrazione con altri modelli di simulazione sviluppati dai partner.

IEA SHC Task 51 "Solar energy and urban planning"

La International Energy Agency (IEA), nell'ambito del programma Solar Heating and Cooling (SHC), a maggio 2013 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 solari, con particolare riferimento a:

1. sviluppo di nuove aree urbane;
2. sviluppo di aree urbane esistenti;
3. paesaggi sensibili o protetti (campi solari).

In tutti e tre i campi appena menzionati, si farà riferimento sia al solare fotovoltaico che al solare termico.

Il lavoro è stato strutturato in quattro principali temi, analizzati in diversi subtask:

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 (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 negli scorsi anni. In particolare, l'ENEA ha partecipato dal 2008 al 2012 alla ricerca condotta in seno al gruppo IEA SHC Task 41 "Solar Energy and Architecture" ed ha partecipato (fino all'Ottobre 2013) all'IEA SHC-EBC Task 40 "Towards Net Zero Energy Solar Buildings" . Inoltre, dal 2011, è responsabile, nell'ambito di un Memorandum of Understading con la European Commission, JRC, 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).

Nel corso dell'anno è stato possibile strutturare un ristretto gruppo di studio interessato alle tematiche del paesaggio all'interno del Task 51. Si tratta di soggetti provenienti da organizzazioni scientifiche (Università de La Reunion) ed imprese private operanti nel campo del solare (Akuo Energy, FR, Green Power Labs, CA).

Nell'ambito di questo sottogruppo (di cui ENEA è leader) sono previste le seguenti attività:

1) strutturazione di una matrice per raccogliere dati di progetto (sensitive landscape project data form), con l'obiettivo di raccogliere dati spaziali e progettuali di supporto alle decisioni ed alla valutazione. Tali dati comprendono: conformazione del paesaggio, caratteristiche del campo solare, connettività, considerazioni ambientali;
2) strutturazione di criteri che consentano a partire dalla matrice sopra descritta, di fissare obiettivi di qualità ambientale ed ecosistemica;
3) sviluppo di un sistema di informazioni di base finalizzato all'elaborazione di un sistema GIS per l'analisi di un certo paesaggio e la valutazione della sua propensione all'inserimento delle tecnologie solari. Tale strumento dovrebbe costituire un primo agile strumento di supporto alla progettazione.

In occasione del meeting di Napoli è stata presentata una bozza del deliverable 1, ed in occasione del prossimo meeting che si terra a Toronto ne verranno presentati alcuni sviluppi.

Diffusione dei risultati

Per diffondere i risultati ottenuti in questa linea di ricerca e per rendere noti tutti gli impianti sperimentali realizzati in Casaccia, è stato costantemente aggiornato il sito internet dedicato ai "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili", che ad oggi ha contato circa 120.000 visite.

Il portale è visitabile accedendo alla pagina web: http://climatizzazioneconfontirinnovabili.enea.it/



Figura 499. Home page del sito internet dedicato "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistiti da fonti rinnovabili"

Dal sito è possibile accedere a varie sezioni. Quella dedicata ai "Laboratori e Impianti" consente di ottenere informazioni sugli impianti e sulle attività di ricerca condotti nei vari laboratori coinvolti nel progetto di Ricerca del sistema Elettrico.

Il sito mette a disposizione due sezioni dedicate all'approfondimento delle tematiche relative alla ricerca di base ed alla ricerca applicata. Accedendo a queste pagine web è possibile avere informazioni dettagliate sulle tecnologie studiate e scaricare la documentazione completa relativa alle attività completate nell'ambito di questo programma di ricerca.

E' stata assicurata la partecipazione a vari convegni insieme alla pubblicazione delle principali attività di ricerca su diverse riviste del settore. Di seguito un riepilogo delle principali attività di diffusione dei risultati afferenti al periodo ottobre 2013 - settembre 2014.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Per lo sviluppo delle attività di ricerca legate ai "sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabile", l'ENEA ha ritenuto opportuno coinvolgere diversi soggetti esterni che hanno dato al lavoro svolto un importante contributo tecnico e scientifico. Di seguito sono riportate le attività che hanno visto la partecipazione di soggetti esterni, la presentazione dei soggetti esterni ed una breve descrizione dei lavori da essi eseguiti.

a. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

Università Sapienza di Roma, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente

All'interno del Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali e Ambiente (DICMA) dell'Università Sapienza di Roma, sono disponibili competenze in diversi settori dello scambio termico e del recupero energetico. In particolare, negli ultimi anni, ed anche nell'ambito di precedenti collaborazioni con l'ENEA, si sono affrontati diversi argomenti di punta relativi allo scambio termico mediante l'impiego di materiali avanzati (nanofluidi e PCM) in diversi settori industriali, che prevedono importanti ricadute di tipo applicativo sia in campo industriale che civile. L'attività di ricerca inerente la Subtask a.1 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università Sapienza: l'università si è concentrata sull'analisi teorica delle modalità di scambio termico tra liquidi e PCM e sullo studio parametrico delle principali variabili in gioco significative ai fini dell'efficienza di scambio e accumulo termico.

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Il Laboratorio di Conversione di Energia Solare, presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova sta portando avanti una attività di ricerca sperimentale su collettori solari piani, a tubo evacuato e a concentrazione. L'attività di ricerca del Laboratorio si è recentemente focalizzata sullo studio di assorbitori solari

ad alta prestazione per applicazione in collettori sia piani che a concentrazione. All'interno del Laboratorio viene portata avanti anche una attività di modellazione e simulazione di collettori solari. Il Laboratorio lavora in sinergia con il Laboratorio di scambio termico con cambiamento di fase dello stesso Dipartimento. Presso tale Laboratorio sono state recentemente caratterizzate le prestazioni termiche di tubi di calore per applicazioni in collettori solari. All'attività sperimentale è stata affiancata una attività volta allo studio di modelli e correlazioni per la previsione del flusso termico scambiato negli heat pipe. Tale esperienza sullo scambio termico in cambiamento di fase risulta utilissima per lo sviluppo di dispositivi innovativi per la conversione di energia solare con scambio termico liquido-vapore. L'attività di ricerca inerente il Subtask a.2 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA ed Università di Padova: l'università si è concentrata sullo studio teorico-sperimentale di collettori solari termici che prevedano l'applicazione delle vapor chamber.

Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici

Il Dipartimento svolge attività di ricerca inerente a soluzioni innovative per la climatizzazione ambientale mediante l'impiego di fonti energetiche rinnovabili. Tale attività si svolge sia a livello di ricerca teorica (sviluppo di modelli matematici, simulazioni dinamiche, algoritmi di ottimizzazione) che sperimentale, in un laboratorio attrezzato per il test di sistemi e componenti di diverso tipo (chiller alimentati termicamente, processi di trattamento aria, collettori solari termici, fotovoltaici ed ibridi, sistemi di storage). L'attività di ricerca inerente il Subtask a.3 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Palermo: l'università si è concentrata sull'analisi dei risultati sperimentali ottenuti dai test funzionali di un sistema compatto solar DEC di piccola taglia a letti fissi raffreddati per applicazioni nel settore residenziale/piccolo terziario, al fine di individuare le strategie di ottimizzazione del prototipo in test. L'Università di Palermo-Dipartimento di Energia 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".

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. Tale Laboratorio sta portando avanti una attività di ricerca sperimentale su collettori solari piani, a tubi evacuati ed a concentrazione. L'attività di ricerca del Laboratorio recentemente si è focalizzata su sistemi a concentrazione e dispone di un concentratore parabolico a fuoco lineare con inseguimento a due assi. Inoltre tale Laboratorio lavora in sinergia con il Laboratorio di scambio termico con cambiamento di fase dello stesso Dipartimento per realizzare dispositivi che utilizzino il fenomeno della vaporizzazione in canali di piccolo diametro. Tale know-how sullo scambio termico bifase per sistemi a concentrazione risulta utilissimo per lo sviluppo di scambiatori di calore innovativi per applicazioni in sistemi ad alta densità di potenza e media temperatura. L'attività di ricerca inerente la Subtask b.2 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Padova: l'università si è concentrata sullo studio teorico-sperimentale di ricevitori piani a mini/micro-canali per sistemi solari a concentrazione in applicazioni di solar-cooling ad alta efficienza.

c. Sviluppo e sperimentazione di pompe di calore elettriche di nuova generazione

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Presso il Laboratorio di tecnica del freddo sono in corso ricerche sulle macchine a compressione di vapore di piccola e media taglia e sullo studio di fluidi refrigeranti di nuova generazione. In particolare, il gruppo di ricerca si è occupato dello studio sperimentale delle prestazioni di fluidi refrigeranti HFC, puri e miscelati, e fluidi puri quali la CO_2, nonché le più recenti idro-olefine, tra cui l' R1234ze(E). Ha inoltre pubblicato diversi articoli riguardanti le prestazioni di macchine a compressione di vapore, analizzando teoricamente e sperimentalmente l'influenza dei parametri di controllo, del fluido refrigerante e della taglia dei singoli componenti. Più di recente ha prodotto anche modelli per la simulazione a regime stazionario e transitorio di tali sistemi. L'attività di ricerca inerente la Subtask c.1 è stata svolta in stretta collaborazione tra ENEA e Università di Napoli Federico II: l'università si è concentrata sull'analisi dei risultati delle prove sperimentali di due prototipi di macchine a compressione di vapore (uno operante con R290 e uno con R134a).

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 specificatamente nelle interazioni con il sistema elettrico, integrandosi in modo competitivo nel contesto dell'utilizzo finale.

I veicoli elettrici, grazie all'accresciuto rendimento del parco di generazione elettrica nazionale, hanno consumi "dal pozzo alla ruota" inferiori a quelli dei veicoli con motore a combustione interna, in special modo con riferimento all'uso urbano di questi ultimi. L'alta efficienza della rete di trasmissione e distribuzione (94%), delle batterie (max. 90%) e dei motori elettrici di ultima generazione (medio su ciclo: 85%) mantengono poi basse le perdite fino alla ruota. Considerando infine la crescente quota delle fonti rinnovabili sul mercato elettrico, lo sviluppo della mobilità elettrica risulta ancora più vantaggiosa di quanto non appaia sia per limitare le importazioni di combustibili fossili e loro derivati che per ridurre le emissioni di CO_2.

I risparmi di energia ottenibili per i veicoli elettrici a batteria (e per gli ibridi "plug-in") vengono incrementati dalla riduzione del peso dell'accumulo di energia "on board", grazie alla diffusione della ricarica rapida ed ultrarapida; quest'ultima è resa possibile dalle nuove tecnologie di batterie e a sua volta rende possibile un dimensionamento meno "prudenziale" della riserva di energia.

Anche nuove tecnologie di ricarica come quella "contactless", utilizzabile nei parcheggi con maggiore facilità d'uso e minore sensibilità agli agenti atmosferici rispetto alle normali colonnine, (oltre al minor rischio di vandalismi) possono ridurre considerevolmente la taglia della batteria anche per le auto, facilitando la ricarica "di opportunità" e contribuendo alla diffusione dei veicoli ibridi plug-in "ad autonomia estesa in solo elettrico", veicoli che, utilizzando prioritariamente l'elettrico, possono essere assimilati, in termini di consumi, all'elettrico puro .

Nel caso di ricarica "contactless" gli indirizzi di standardizzazione (SAE International J2954 Task Force for Wireless Power Transfer) indicano una frequenza di lavoro di 85 kHz. Le interazione dei campi elettromagnetici con gli esseri umani divengono a questo punto di interesse per valutare i rischi connessi ala presenza delle persone in prossimità della stazione di ricarica.

Lo sviluppo delle strutture di alimentazione dei veicoli elettrici su gomma offre infine positive possibilità di interazione verso la rete elettrica. Ad esempio, 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.

La ricarica rapida per il suo maggiore impegno in potenza si colloca come elemento critico per la realizzazione di stazioni di "rifornimento" per i veicoli elettrici. Potenza installata ed energia erogata dipendono dal numero di punti di ricarica e dalla quantità di veicoli serviti. Un ausilio alla potenza impegnata sulla rete di distribuzione può essere fornito dalla presenza di sistemi di accumulo stazionario che eroghino potenza durante i picchi di ricarica e si ricarichino dalla rete successivamente. Le fonti rinnovabili sono in grado in questo contesto di fornire il loro contributo in energia provvedendo alla ricarica dell'accumulo e riducendo il prelievo da rete. L'insieme di questo complesso di sorgenti offre la possibilità di utilizzare i flussi energetici al meglio della loro disponibilità e della convenienza energetica ed economica dei prelievi.

In contesti di larga diffusione dei veicoli elettrici potrebbero crearsi situazioni di sovraccarico nei momenti di picco della richiesta di energia per cui diviene necessario l'utilizzo di tecnologie e strategie che permettono l'inter-facciamento controllato bidirezionale tra una rete elettrica e i sistemi di accumulo dei veicoli indicato con "vehicle to grid" (V2G). L'idea alla base del V2G è che le batterie operino non solo come utilizzatori di energia ma possano a loro volta fornire energia contribuendo in maniera attiva a mantenere le condizioni di operatività della rete all'interno dei limiti specificati sia per quanto riguarda il carico massimo che le variazioni di frequenza della tensione. Il controllo del flusso di energia tra la rete e le batterie consente al gestore della rete di utilizzare le batterie come generatori distribuiti, capaci non solo di iniettare –secondo le necessità- potenza attiva in rete ma anche di scambiare con essa potenza reattiva sia di segno positivo che negativo. L'azione di scambio di energia reattiva può essere ottenuta mediante un controllo dei convertitori di interfaccia tra rete e batterie che regoli il

fattore di potenza del carico costituito dal sistema di ricarica delle batterie, in modo analogo a quanto avviene con i compensazione attivi.

Un ruolo importante per la diffusione della mobilità elettrica è quello interpretato dagli ibridi Plug-in (PHEV), che, eliminando la così detta "range anxiety" e quindi la conseguente necessità di una larga diffusione delle colonnine di ricarica, permettono una concreta penetrazione dell'elettrico già oggi. L'installazione sul territorio delle colonnine di ricarica potrà quindi avvenire con la gradualità necessaria e consentirà ai veicoli elettrici (BEV) di trovare una buona rete di punti di ricarica quando avranno perfezionato le prestazioni di autonomia.

La diffusione dei PHEV alleggerisce anche i problemi di rete non comportando la necessità della ricarica veloce, che, in ogni caso, se venisse usata è limitata a pochi kWh della sua batteria. Inoltre, diversamente dal BEV, il PHEV può più facilmente ricaricare in differenti orari. Basti pensare che la sua ricarica potrebbe durare anche meno di 2 ore e quindi dall'ultima sosta giornaliera al suo riutilizzo del giorno successivo si può tranquillamente scegliere la fascia orarie che il gestore di rete può raccomandare. Infine il veicolo plug-in è idoneo anche alle applicazioni del V2G. Infatti poiché il suo tempo di ricarica è una modesta percentuale del tempo di sosta, ha una buona possibilità di scelta per caricarsi dalla rete, nelle ore di bassa richiesta e per poi restituire nelle ore di punta l'energia caricata.

L'ibrido plug-in favorisce quindi il passaggio dal termico all'elettrico, grazie a veicoli di uso più generico rispetto al BEV, in modo meno dipendente dalla diffusione delle colonnine e creando meno problemi alla rete elettrica, fornendo anzi opportunità di gestione innovative.

La ricarica rapida assume importanza anche nel contesto del trasporto pubblico in quanto consente la realizzazione di linee di trasporto pubblico esercite con veicoli elettrici dotati di accumulo limitato rispetto alle alte percorrenze giornaliere tipiche del servizio collettivo. La possibilità di eseguire ricariche rapide ad intervalli cadenzati che si inseriscono all'interno dell'orario di servizio ed eseguite in stazioni allocate presso i capolinea ampliano l'autonomia dei veicoli elettrici per il servizio pubblico.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Le attività sviluppate nel progetto sono rivolte a studi ed applicazioni relative al settore di innovativi per il risparmio energetico nel settore dei trasporti. In particolare 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 alla sperimentazione della ricarica rapida, tanto in c.c. che in c.a.

In previsione del consistente impatto dell'intero sistema dei trasporti collettivi sui consumi di energia elettrica, già molto alti, si è poi ritenuto, nell'ambito delle azioni di coordinamento con RSE SpA, di dover approfondire il tema delle interazioni tra veicoli elettrici (merci e passeggeri) e reti di distribuzioni dell'energia, con l'analisi della distribuzione, nel tempo e nello spazio, dei carichi dovuti alla mobilità elettrica, secondo le prevedibili linee di sviluppo della stessa**.** Attraverso lo studio della domanda di mobilità privata, di trasporto pubblico e di trasporto merci in ambito urbano, è infatti possibile stimare la domanda di energia elettrica necessaria per la ricarica dei veicoli, con la sua più probabile distribuzione nel tempo e nello spazio.

Altre attività riguardano la sperimentazione su veicolo della ricarica, con due modalità di ricarica, per contatto e senza.

L'attività prevede due obiettivi intermedi, più un obiettivo relativo alla comunicazione e diffusione dei risultati.

a. Componenti e strutture di alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi, per la ricarica rapida in c.a. e in c.c.
b. Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti
c. Comunicazione e diffusione dei risultati.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

a. Componenti e strutture i alimentazione innovative per veicoli elettrici e/o ibridi per la ricarica rapida in c.a. in c.c.

La capacità di accumulo è uno degli elementi che assumono valenza al fine della determinazione della profondità di diffusione del veicolo elettrico nel contesto della mobilità urbana. L'accumulo elettrico basato sulle prestazioni della tecnologia al litio offre interessanti prospettive per fornire un'adeguata autonomia ai veicoli ponendoli in grado di soddisfare le necessità di autonomia all'interno della mobilità giornaliera. Un ulteriore passo avanti nella

direzione di ampliare l'autonomia dei veicoli è possibile operando sul fronte della riduzione dei tempi di ricarica che consentirebbero l'effettuazione di più ricariche al giorno. Tenendo in mente questa opportunità le attività comprese nell'obiettivo a intendono esplorare il tema della ricarica sia sotto l'aspetto sistemico che sotto quello più strettamente tecnologico, ivi compresa l'opportunità di eseguirla tramite sistemi di tipo contactless, adeguandosi alle indicazioni sull'interoperabilità che uniformano a 85 kHz la frequenza di risonanza.

La ricarica rapida (sia eseguita in modalità contactless che conduttiva) è una soluzione idonea per la creazione di "distributori" stradali di energia. I ridotti tempi di ricarica implicano potenze non adeguate a utenze residenziali mentre sono possibili per utenze in grado di rifornire energia a molti veicoli (sequenzialmente e/o contemporaneamente). La richiesta di potenza nelle svariate fasce orarie potrebbe mettere in crisi la rete di distribuzione locale qualora il prelievo sia eccessivo. L'integrazione della rete con sistemi di accumulo stazionario e fonti rinnovabili è una delle prospettive più interessanti. L'obiettivo a si è concentrato in generale, sulla progettazione di una piattaforma numerica che, in funzione delle specifiche relative alle sorgenti di alimentazione e alle esigenze di carico, consentisse di dimensionare le taglie dei sottosistemi in relazione alle tipologie dei convertitori e dei flussi energetici. In questo quadro la determinazione di una "funzione di ottimo" che tenga presente il costo dell'energia elettrica in funzione della fascia oraria, il costo e l'usura del sistema di accumulo, il costo e la disponibilità della fonte rinnovabile, il costo del convertitore e la disponibilità dell'energia rinnovabile, è la chiave per l'ottimizzazione del processo di progettazione e gestione dell'impianto integrato.

Valutazioni in campo sui vantaggi dell'integrazione sono state condotte utilizzando il sistema di ricarica rapida integrato con il compensatore statico presente presso i laboratori ENEA. Si è ritenuto ugualmente importante valutare sperimentalmente, grazie alla realizzazione di un prototipo da banco, sia le problematiche costruttive dei sistemi contacless che l'esposizione ai campi E/B. Questi sistemi, infatti, a potenze significative, potrebbero impattare sulla salute umana dei soggetti che si trovino nelle vicinanze del veicolo durante le operazioni di ricarica.

a.1 Sviluppo e realizzazione di un sistema di ricarica contactless per micro vetture

I sistemi che trasferiscono energia elettrica da una sorgente ad un utilizzatore senza che vi sia alcun contatto tra i due (sistemi contactless o wireless o plugless) sono attraenti per molti impieghi industriali e civili grazie alla loro facilità e sicurezza d'uso. Infatti non richiedono l'inserimento di spine nelle prese, né l'utilizzo di cavi di collegamento tra la sorgente e l'utilizzatore.

I sistemi contactless, più convenienti per le applicazioni di potenza, utilizzano l'accoppiamento induttivo tra due bobine, trasmittente (o primaria) e ricevente (o secondaria). Nel caso di un sistema contactless impiegato per la ricarica degli accumulatori di un veicolo elettrico, la bobina trasmittente è interrata, mentre la bobina ricevente è posta a bordo del veicolo. I sistemi di accoppiamento induttivo con topologia risonante possiedono un'efficienza nel trasferimento di energia maggiore di un accoppiamento induttivo ed inoltre sono in grado di trasferire alla bobina ricevente, anche se non allineata, una quota significativa dell'energia elettrica resa disponibile dalla sorgente, mantenendo una efficienza elevata.

Il lavoro svolto nel subtask a.1 è relativo allo sviluppo di un caricabatteria contactless risonante per la ricarica degli accumulatori (48 V, 100 Ah) di una city car elettrica che costituisce il caso di studio considerato. Lo studio ha utilizzato come base di partenza i risultati ottenuti nella precedente annualità [rapporto RdS/2013/182] che includevano il dimensionamento dei componenti/circuiti di potenza del caricabatteria.

Tre sono state le attività nelle quali si è articolato il lavoro di sviluppo del caricabatteria contactless risonante:

- *La rideterminazione del dimensionamento dei componenti di potenza* del caricabatteria alla luce dell'elaborato prodotto dalla "SAE International J2954 Task Force for Wireless Power Transfer (WPT)" rilasciato nel novembre 2013, che - al fine di favorire l'interoperabilità dei caricabatteria contactless - ha uniformato la frequenza di risonanza al valore di 85 kHz. Questo valore giace all'interno della banda di frequenze disponibili in sede internazionale, compresa tra 81,38-90 kHz.
- *la progettazione dei sottosistemi* che compongono il caricabatteria, segnatamente:
  - le due bobine con le relativa struttura di accoppiamento;
  - i condensatori che rendono risonante l'accoppiamento;
  - l'invertitore ad alta frequenza (AF, 85 kHz) che alimenta la bobina trasmettente;
  - gli altri convertitori di potenza: essi sono il raddrizzatore a diodi posto in cascata alla bobina ricevente e il chopper, che posto a valle del raddrizzatore a diodi, controlla la corrente/tensione di ricarica degli accumulatori della city car;

- i circuiti di interfaccia per la trasduzione delle grandezze elettriche del caricabatteria e per il comando dei convertitori controllati (invertitore e chopper) e le loro connessioni con l'unità elettronica di controllo (ECU) del caricabatteria, costruita attorno ad un processore digitale di segnali (DSP);
- gli algoritmi di controllo e di gestione del caricabatteria.
  La progettazione dei convertitori che funzionano ad AF (invertitore e raddrizzatore) ha utilizzato dispositivi di potenza a semiconduttore di ultima generazione (i cosiddetti dispositivi Wide Band Gap, WBG) al fine di massimizzare il rendimento del caricabatteria;

- *la realizzazione prototipale* del caricabatteria, che si è a sua volta articolata nelle seguenti attività:
  - misura dei parametri induttivi delle bobine;
  - disegno delle schede di interfaccia e di potenza e loro montaggio;
  - programmazione degli algoritmi di controllo e di gestione nel DSP;
  - assemblaggio al banco del prototipo, e svolgimento di prove sperimentali per verificarne il corretto funzionamento.

Il lavoro mira ad aumentare l'efficienza del trasferimento contactless dell'energia elettrica per la ricarica degli accumulatori di un veicolo elettrico. L'obiettivo è raggiunto mediante l'impiego di sistemi contactless con topologia risonante e di dispositivi WBG al carburo di silicio (SiC) nei convertitori statici funzionanti ad AF. Il lavoro è la naturale prosecuzione delle attività di ricerca svolte nella precedente annualità. Esse erano consistite in due fasi: una prima fase di studio comparativo delle topologie induttiva e risonante dei sistemi contactless di trasferimento dell'energia elettrica e una seconda fase di dimensionamento dei principali circuiti e componenti di potenza (invertitore ad AF, bobine di accoppiamento, condensatori di risonanza) di un caricabatteria contactless risonante alla frequenza di 40 kHz per una city car elettrica. La city car allora considerata è la stessa utilizzata nel presente lavoro ed è equipaggiata con un pacco accumulatori da 48 V, 100 Ah.

Il funzionamento a 85 kHz del caricabatteria contactless risonante non modifica il dimensionamento dello stadio di carica poiché esso dipende dalla massima potenza assorbita dagli accumulatori, pari a 560 W, e dalla tensione massima ai morsetti. Modifica invece sostanzialmente il dimensionamento delle bobine e dei condensatori di risonanza e marginalmente le sollecitazioni alle quali i citati componenti sono sottoposti. Inoltre modifica, aumentandola, l'efficienza del trasferimento di energia con la conseguente riduzione della corrente prelevata da rete. Tuttavia aumenta anche le perdite di commutazione nell'invertitore ad AF e nel raddrizzatore a diodi dello stadio ricevente. Supponendo che i due fenomeni si compensino, resta invariato il dimensionamento dello stadio di alimentazione. Con una stima conservativa del rendimento uscita-ingresso del caricabatteria pari a 80%, la massima potenza che esso assorbe da rete è 700 W.

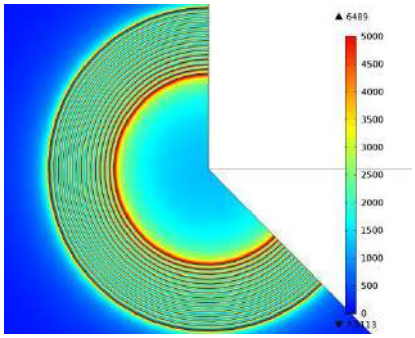


Figura 500. induzione magnetica su nucleo di ferrite

In base alle nuove specifiche per le bobine è stata studiata e progettata la loro configurazione geometrica mediante il programma agli elementi finiti. Lo studio ha mostrato che l'avvolgimento a spirale offre i migliori risultati per il coefficiente di accoppiamento tra le due bobine e che i nuclei magnetici ad I sono i più convenienti. Per il nucleo è stata scelta una ferrite con induzione residua di 0,1 T e permeabilità magnetica relativa maggiore di 1000. La Figura 500 riporta a titolo di esempio l'induzione magnetica calcolata sulla superficie di una bobina a spirale percorsa da 1 A e appoggiata sul nucleo di ferrite.

I condensatori di risonanza sono stati realizzati collegando in parallelo-serie più condensatori EPCOS B32652A1153. Ognuno di essi ha una capacità di 15 nF e sostiene una tensione di circa 300 V ad una frequenza di lavoro di 85 kHz. Pertanto il valore richiesto di capacità è stato ottenuto collegando in parallelo 8 stringhe di condensatori ognuna formata da 4 condensatori in serie. La tensione massima è risultata di 1200 V.

L'invertitore ad AF è un ponte ad H è stato realizzato utilizzando due gambe del modulo di potenza trifase CCS050M12CM2, prodotto dalla ditta CREE (Figura 501). Il modulo è formato da transistori SiC MOSFET. I SiC MOSFET hanno una resistenza di conduzione molto bassa che consente di ridurre sensibilmente le perdite nei dispositivi durante la conduzione, incrementando l'efficienza del caricabatteria. Questa caratteristica si aggiunge alla intrinseca proprietà dei dispositivi SiC di commutare in tempi molto brevi, il che consente loro di funzionare ad AF mantenendo contenute le perdite di commutazione.



Figura 501. Modulo potenza trifase CCS050M12CM2 (tecnologia SiC)

I raddrizzatori a diodi dello stadio trasmittente e ricevente ed il chopper dello stadio ricevente sono stati progettati con un approccio tradizionale. Per il raddrizzatore a diodi dello stadio trasmittente è stato usato il ponte raddrizzatore monofase KBPC606. Il condensatore d'uscita ha una capacità di 4,7 mF e una tensione di targa di 400 V. Per il raddrizzatore a diodi dello stadio ricevente sono stati utilizzati diodi SiC Schottky (SCS240AE2HR) mentre per il chopper sono stati utilizzati un SiC MOSFET (SCT2120AF) e un diodo di ricircolo SiC Schottky (SCS220AE2). Il condensatore d'uscita del raddrizzatore ha una capacità di 220 F e una tensione di targa di 160 V.

Il caricabatteria contactless risonante contiene due convertitori controllati: l'invertitore ad AF ed il chopper. Il controllo è eseguito da due ECU disposte nei due stadi e costruite attorno al DSP Texas F282335. I DSP generano i segnali di comando per i due convertitori (e gestiscono le operazioni del caricabatteria, incluse quelle di protezione) in funzione dei valori assunti dalle tensioni $V_{DC,T}$ e $V_{DC,R}$ e delle correnti i_S, i_L e i_B (Figura 502). L'applicazione dei comandi generati dai DSP ai gate dei transistori dei convertitori e la trasduzione, il condizionamento e l'acquisizione delle tensioni e delle correnti da parte dei DSP hanno richiesto la progettazione e la realizzazione di idonei circuiti elettronici. Le schede di potenza per i due stadi hanno invece richiesto un'apposita progettazione e realizzazione dal momento che esse usano convertitori di tipo diverso.

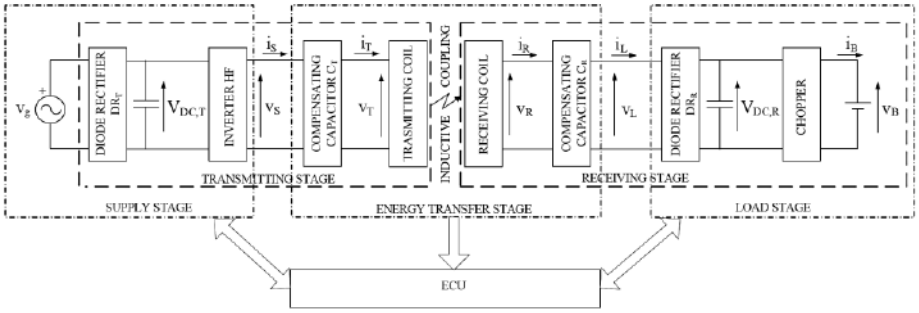


Figura 502. Schema a blocchi di un caricabatteria contactless risonante

La realizzazione dei circuiti stampati è stata affidata ad una ditta esterna mentre il montaggio di tutti i componenti elettronici è stato effettuato in laboratorio. Le schede di potenza sono state montate su radiatori che, oltre a dissipare il calore prodotto dai convertitori, hanno anche una funzione di supporto delle schede (Figura 503).

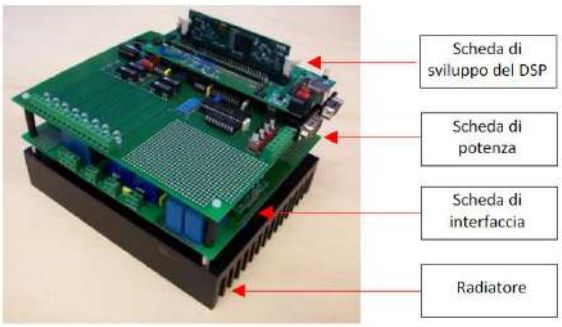


Figura 503. Modulo di potenza Tx11

Infine è stato allestito un banco prova per sottoporre il caricabatteria ad alcuni test sperimentali. In questa prima fase di test, seguendo le usuali procedure cautelative di sperimentazione, il caricabatteria è stato alimentato tramite un variac e le schede di interfaccia sono state alimentate mediante alimentatori stabilizzati regolabili e limitati in corrente. Come carico è stato impiegato un reostato con il quale si sono riprodotte le condizioni elettriche che si ottengono durante il processo di ricarica del pacco accumulatori. Il banco di prova è mostrato in Figura 504.



Figura 504. Banco prova

A titolo di esempio si riportano i risultati sperimentali ottenuti quando il pacco accumulatori è ricaricato con la corrente nominale e la tensione ai suoi morsetti è pari a quella massima. In queste condizioni di ricarica, il pacco accumulatori assorbe la massima potenza.

La Figura 505a mostra gli andamenti della tensione generata dall'invertitore ad AF e della corrente che percorre la bobina trasmittente. Come si nota dai tracciati, la tensione varia tra -80 V e +80 V, mentre l'ampiezza della corrente è di 6 A. Inoltre si rileva che la corrente è praticamente in fase con l'armonica fondamentale della tensione generata dall'invertitore.

L'andamento della corrispondente corrente nella bobina ricevente è mostrato in Figura 505b, insieme con l'andamento della tensione generata dall'invertitore ad AF. Si riconosce che la corrente ha un'ampiezza di circa 13 A ed è praticamente in quadratura con la componente fondamentale della tensione generata dall'invertitore.

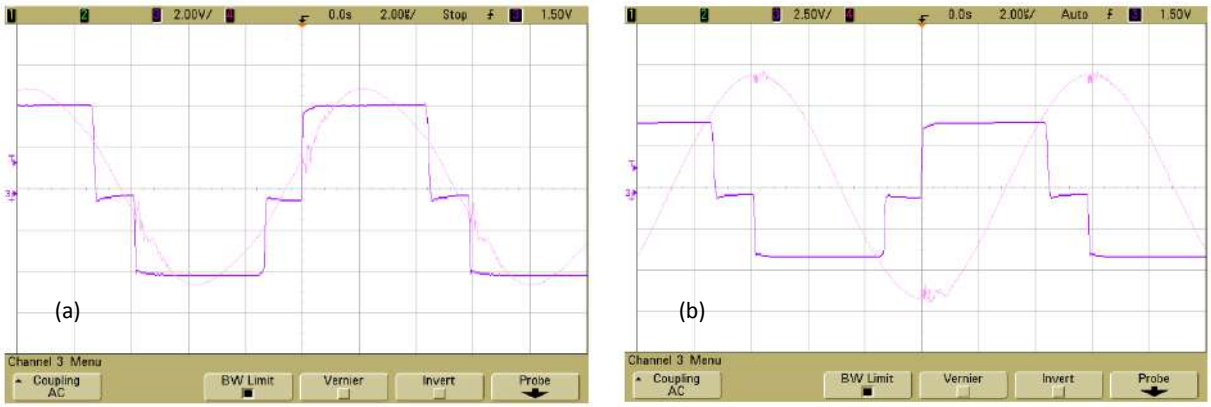


Figura 505. Corrente e tensione nella bobina trasmittente (a) e ricevente (b)

I risultati delle prove confermano innanzitutto quanto previsto dalla teoria sul funzionamento dell'accoppiamento magnetico risonante in relazione all'allineamento delle correnti rispetto alla componente fondamentale della tensione generata dall'invertitore ad AF. Inoltre essi convalidano appieno i dati di progetto. In particolare, confermano che la tensione generata dall'invertitore ad AF ha una forma d'onda quasi quadra e che le correnti che circolano nelle bobine hanno una forma d'onda pressoché sinusoidale e la loro ampiezza è pari al valore di specifica.

Ulteriori sviluppi della ricerca potrebbero essere finalizzati all'esame di topologie alternative di risonanza, allo studio di configurazioni ad hoc per l'invertitore ad AF, all'analisi del comportamento del caricabatteria in condizioni non stazionarie, alla sintesi di idonei algoritmi di controllo, ecc. Si noti come gli ulteriori sviluppi sono molteplici dal momento che la ricerca nel settore è appena iniziata e pertanto non esistono standard progettuali che definiscano le soluzioni ottimali in termini di efficienza nel trasferimento di energia, di topologie/ configurazioni circuitale, di dimensionamento dei componenti di potenza e di robustezza degli algoritmi di controllo di un caricabatteria wireless risonante, eventualmente calibrate sulla specifica applicazione.

La valutazione dell'esposizione del personale ai campi elettromagnetici residui emessi dal prototipo finale di STEESC è stata eseguita da personale ENEA presso l'Università di Padova. Nell'ambito del presente progetto il gruppo di Bioelettromagnetismo dell'Unità Tecnica di Biologia delle Radiazioni e Salute Umana dell'ENEA è stato coinvolto per la caratterizzazione sperimentale del sistema di bobine realizzato, nonché per la valutazione del rischio derivante dall'esposizione ai campi elettromagnetici residui, emessi dal prototipo realizzato dai ricercatori dell'università coinvolti nel progetto.

La caratterizzazione sperimentale del sistema di bobine ha confermato i risultati delle simulazioni svolte dall'università di Padova in termini di induttanza e mutua induttanza delle bobine. Chiunque operi in prossimità di un sistema che ha una frequenza di lavoro di 85 kHz subisce una esposizione a un campo elettromagnetico di tipo "campo vicino", per questo motivo una caratterizzazione dello scenario espositivo passa necessariamente attraverso la misura del campo elettrico (E) e di induzione magnetica (B). Dopo un'analisi in loco dello scenario espositivo si sono decisi i punti di misura, posizionati su un piano frontale alle bobine posto a 30 cm da queste (Figura 506).

Dalle misure effettuate si evince la conformità dell'esposizione ai limiti imposti dalla Direttiva Europea 2013/35/EU per i lavoratori esposti ai campi elettromagnetici, sia in termini di E che di B (Figure 507 e 508). I risultati ottenuti, però, conducono ad alcune considerazioni. I valori di E misurati a una distanza di 30 cm dalle bobine sono superiori ai livelli imposti dalla normativa europea e italiana per la popolazione, per questo motivo sarà necessario eseguire analoghe misure sul sistema nelle reali condizioni di utilizzo, vale a dire montato sotto

l'automobile. Inoltre, saranno necessari studi di valutazione numerica del campo elettrico indotto all'interno dei corpi esposti a questo tipo di sorgente, al fine di valutare l'effettivo livello di interazione tra i campi elettromagnetici residui dello STEESC e i sistemi biologici.

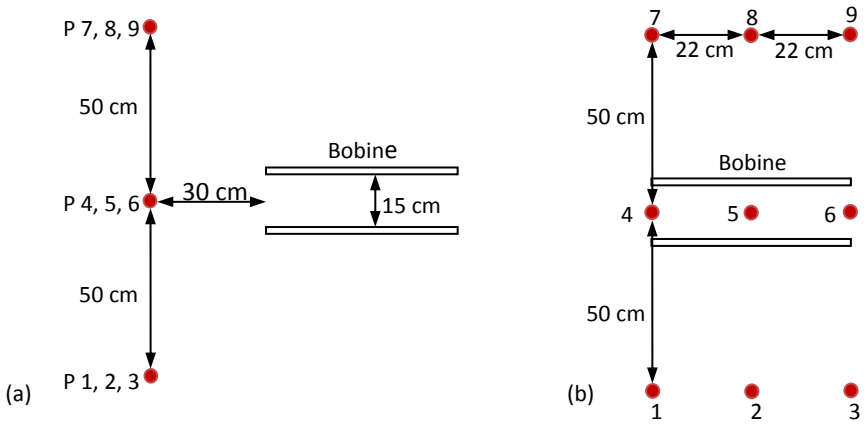


Figura 506. Visione laterale (a) e frontale (b) dei punti di misura del campo E/B

Il superamento dei limiti i campo E hanno indotto all'esecuzione di una misura nel punto 5 ponendo una griglia metallica tra le bobine e il sensore. Il valori rilevati E = 0,4 V/m e B = 0,07 µT sono di più di 2 ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori misurati senza griglia confermando il beneficio dell'interposizione di uno schermo.

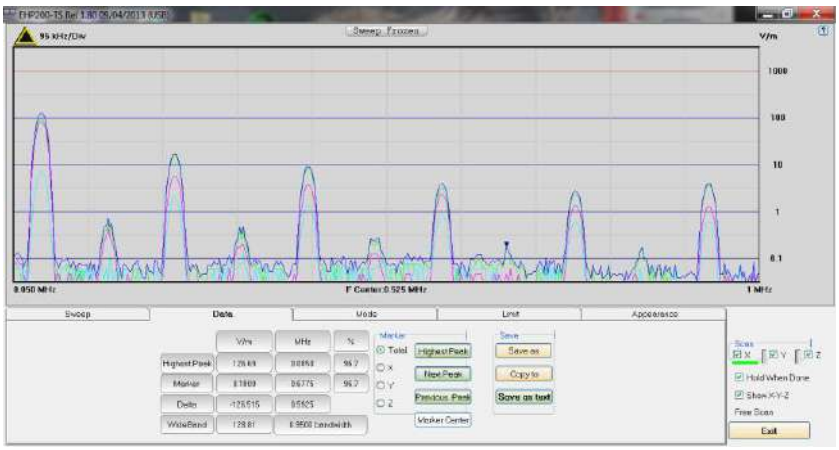


Figura 507. Spettro campo E

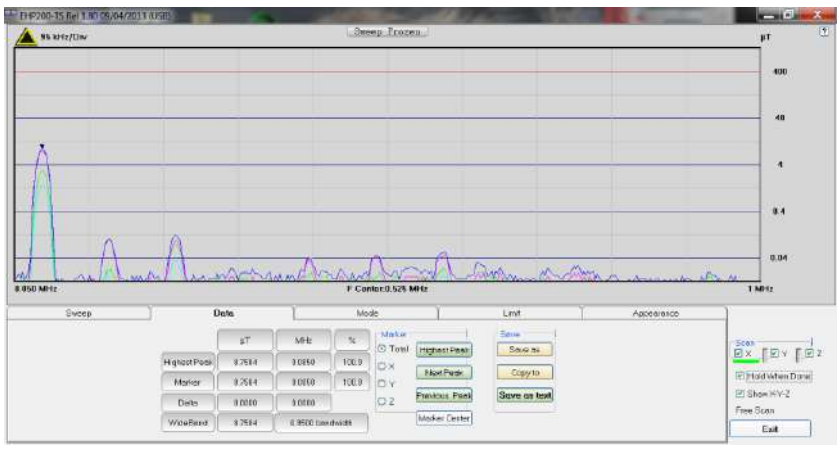


Figura 508. Spettro induzione B

Un possibile sviluppo futuro riguarda le valutazioni di esposizione, numerico-sperimentali, su sistemi a potenze maggiori (qualche kW), che rappresentano l'evoluzione per questo tipo di applicazioni. Infatti il loro impatto sull'esposizione della popolazione dovrà essere valutato ed eventuali soluzioni di schermaggio dovranno essere implementate, nella prospettiva di un impiego su larga scala di questo tipo di dispositivi.

Dettagli sulle attività descritte sono riportati nei rapporti RdS/PAR2013/098 e RdS/PAR2013/104.

a.2 Progettazione e studio di un convertitore per stazione di ricarica rapida in c.c. con accumulo elettrico stazionario, per l'integrazione nel sistema dei trasporti di E.E. da fonti rinnovabili non programmabili

La mobilità elettrica è considerata, in un'ottica di sviluppo sostenibile, l'unica soluzione per far fronte al considerevole aumento di richiesta di mobilità in ambito urbano ed extraurbano. I veicoli elettrici offrono, rispetto ai veicoli tradizionali, una serie di evidenti vantaggi in termini di impatto ambientale. Negli ultimi anni Governi centrali e locali, la Commissione Europea e le organizzazioni internazionali hanno fortemente promosso la mobilità elettrica e, in alcuni casi, hanno introdotto politiche incentivanti per lo sviluppo della tecnologia e del mercato in questo settore. Tuttavia, una reale mobilità ad "impatto-zero" non può basarsi esclusivamente sul veicolo, ma deve integrare anche il resto della "catena del valore" per la mobilità, che include:

- generazione da fonti rinnovabili;
- gestione della distribuzione dell'energia attraverso l'approccio delle "*smart-grid*";
- integrazione ottimizzata delle infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici all'interno delle reti elettriche urbane;
- incremento dell'efficienza energetica nelle aree urbane, con lo scopo di ridurre l'impatto sulla rete delle infrastrutture di ricarica;
- *smart-management* delle stazioni di ricarica per veicoli elettrici;
- apparati di conversione statica dell'energia ad altissima efficienza sia a bordo veicolo che a terra;
- sistemi ICT per l'integrazione dei servizi per la mobilità urbana.

Sul fronte delle infrastrutture di ricarica, oltre alla necessità di garantire l'approvvigionamento energetico dei veicoli elettrici da fonti rinnovabili, si evidenzia anche un grosso limite tecnico alla diffusione massiccia delle infrastrutture di ricarica all'interno delle aree urbane dovuto alle linee elettriche istallate nei centri storici, che non sono quasi mai adeguate a soddisfare una crescita progressiva dell'uso dei veicoli elettrici. Per tale motivo, lo sviluppo e la progressiva diffusione di veicoli elettrici deve essere necessariamente accompagnata da un adeguamento della rete di distribuzione dell'energia elettrica, che non significa solo realizzare nuove linee elettriche ma migliorare anche l'utilizzo di quelle esistenti mediante l'integrazione della generazione distribuita e dei sistemi di accumulo. L'Università di Cassino ha prodotto una interessante analisi di queste problematiche nell'ottica della progettazione di una stazione di rifornimento integrata [rapporto RdS/PAR2013/099].

Nell'ambito dello studio è stato sviluppato un sistema di conversione statica dell'energia elettrica basato su una struttura modulare (Figura 509) che consente di interfacciare una infrastruttura di ricarica per veicoli elettrici anche complessa con diverse sorgenti di alimentazione e sistemi di accumulo combinati. L'obiettivo è ottimizzare i flussi di potenza per diminuire o, addirittura, annullare l'impatto dell'infrastruttura di ricarica sulla rete elettrica di distribuzione.

La ricerca svolta si è concentrata non solo su una possibile implementazione del convertitore innovativo ad alta efficienza ma, più in generale, sulla progettazione di una piattaforma numerica che, in funzione delle specifiche relative alle sorgenti di alimentazione e alle esigenze di carico, consentisse di:

- dimensionare la taglia delle singole unità del convertitore;
- definire la migliore tipologia di convertitore di potenza in funzione dell'efficienza di

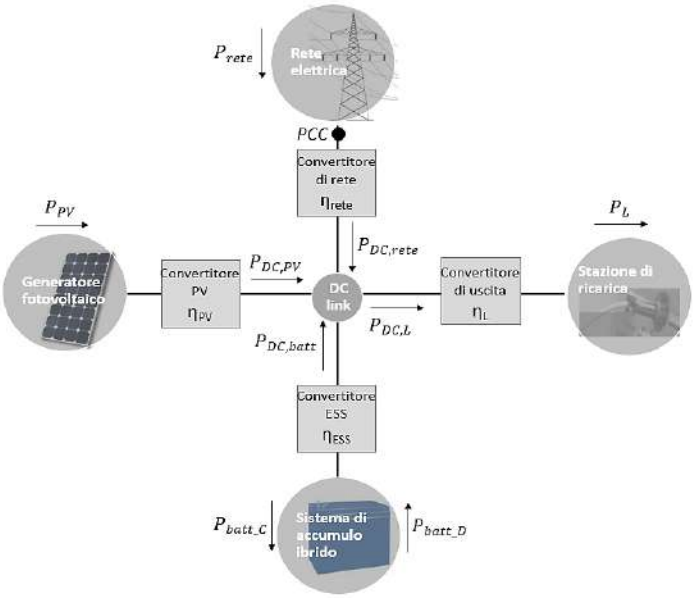


Figura 509. Struttura del convertitore modulare per infrastrutture di ricarica con accumulo integrato

conversione complessiva;
- dimensionare il sistema di accumulo energetico;
- dimensionare l'eventuale sistema di generazione da fonte rinnovabile (principalmente fotovoltaico);
- definire istante per istante i flussi di potenza ottimali.

Tale obiettivo è stato raggiunto grazie alla definizione di una "funzione di ottimo" che tenesse conto di molteplici fattori, quali: costo dell'energia elettrica in funzione della fascia oraria, costo e usura del sistema di accumulo, costo e disponibilità della fonte rinnovabile, costo del convertitore in funzione della sua tipologia e della sua efficienza, profili di assorbimento del carico, piano di ammortamento di tutto l'impianto. La piattaforma realizzata è costituita da due "*layer*" di simulazione denominati *layer di sistema* e *layer di dispositivo*, che sono interlacciati fra loro mediante un sistema di tipo ricorsivo. Come mostrato in Figura 510 a partire dall'assegnazione dei vincoli sia funzionali che sia di costo, l'interazione tra i due *layers* consente di identificare il progetto di investimento con il migliore ritorno economico su un prefissato orizzonte temporale.

La necessità di avere due livelli di simulazione distinti, seppur integrati fra loro, nasce dall'esigenza di separare le dinamiche dei vari sotto-sistemi in funzione delle loro costanti di tempo. In questo modo si riesce a ridurre notevolmente il tempo di elaborazione, senza prescindere dalla generalità della piattaforma e dalla precisione dei risultati.

Nel *layer di sistema*, l'algoritmo di ottimizzazione consente di minimizzare il costo di esercizio nel periodo di osservazione considerato (giorno, mese, anno) per diverse configurazioni della infrastruttura di ricarica, in termini di potenza delle sorgenti e tipologia di convertitori statici. Con questo strumento è possibile, variando sia la taglia dei componenti che la tipologia dei convertitori, valutare diversi progetti di investimento al fine di identificare quello migliore.

Nel secondo *layer di dispositivo*, un simulatore numerico valuta per le varie soluzioni tecnologiche e taglie prese in considerazione dal *layer di sistema*, oltre che le funzionalità dell'intera infrastruttura, le prestazioni delle singole unità di conversione in termini di efficienza, *Power Quality* e costi.

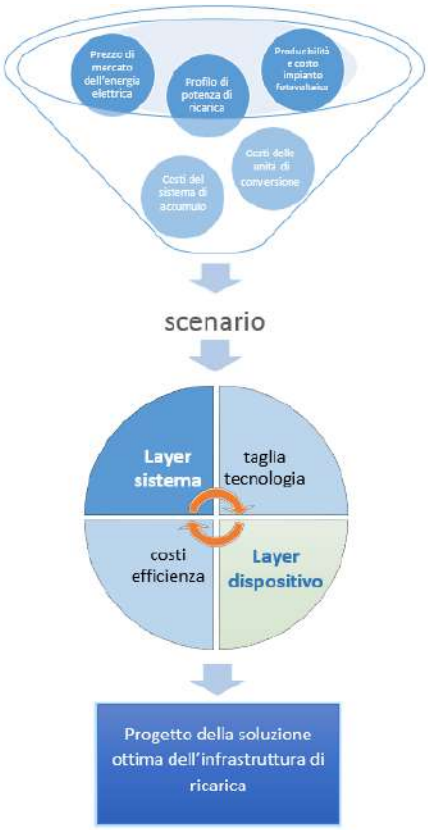


Figura 510. *Flowchart* della piattaforma di progettazione dell'infrastruttura di ricarica

Per il sistema di conversione sono state sviluppate e analizzate delle configurazioni e delle tecniche di controllo e modulazione innovative rispetto allo stato dell'arte che consentono di aumentare l'efficienza di conversione. Le tipologie di convertitori "innovativi" presentate (affiancate nella piattaforma anche a tipologie più tradizionali), le tecniche di modulazione ad alte prestazioni, nonché la piattaforma a due *layers* finalizzata alla progettazione ottimale del sistema di conversione e controllo dei flussi di potenza, rappresentano un contributo originale rispetto allo stato dell'arte. In particolare, per quanto riguarda i convertitori, sono state considerate tipologie multilivello/parallelo, opportunamente controllate da tecniche avanzate di modulazione dei componenti statici (come l'*interleaving*); la piattaforma di progettazione è stata implementata attraverso un codice opportunamente sviluppato dai ricercatori dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale, messo a disposizione di ENEA in forma "aperta" per l'utilizzo/personalizzazione e per ulteriori sviluppi. I modelli dei convertitori sono stati validati anche attraverso un'intensa attività sperimentale, che ha visto la realizzazione di diversi prototipi in scala di convertitori dc/dc ed ac/dc.

L'utilizzo della piattaforma numerica ha consentito di determinare, per diversi scenari operativi, il migliore progetto di investimento per un'infrastruttura di ricarica multi-standard per veicoli elettrici in termini di taglie delle sorgenti ausiliarie e tecnologia del convertitore modulare. Attraverso un'analisi tecnico-economica è stata validata la soluzione del sistema di conversione proposto e l'algoritmo per la gestione ottimale dei flussi di potenza che consente di minimizzazione l'impatto delle ricarica sulla rete di alimentazione in termini di energia, di potenza e di *Power Quality*.
L'architettura della piattaforma risulta fortemente flessibile ed adattabile a diversi scenari di sviluppo della mobilità elettrica e diverse tecnologie di conversione statica dell'energia. La piattaforma può essere utilizzata sia per analisi ex-ante (progettazione e dimensionamento di impianti nuovi), che ex-post (verifica delle prestazioni e

calcolo dei piani di ammortamento di impianti già esistenti). Inoltre, modificando le variabili di sistema, è anche possibile calcolare il gap che sussiste fra i costi attuali dei vari componenti dell'impianto (soprattutto batterie e fotovoltaico) e quelli che permetterebbero di avere un ritorno economico dell'investimento iniziale in un tempo di ammortamento stabilito. Tale possibilità riveste sicuramente un notevole interesse nella definizione di possibili piani di incentivazione economica o nella pianificazione di opportune strategie di sviluppo legate alla mobilità elettrica.

Come già detto, la ricarica rapida è una delle possibili azioni in grado di fornire un sostanziale ausilio allo sviluppo della mobilità elettrica. La ricarica rapida richiede in questo caso l'impegno di potenza di almeno un ordine di grandezza superiore a quella domestica. Si debbono pertanto affrontare problemi relativi alla qualità della potenza prelevata dalla rete a causa delle non linearità dei sistemi di conversione associate ai livelli di potenza forniti. Ma la ricarica rapida oltre agli aspetti di interfaccia con la rete in termini di qualità deve affrontare anche quelli relativi ai livelli di potenza richiesta nel contesto di un servizio aperto al pubblico. La fruizione di un servizio di ricarica tipico di una stazione di rifornimento apre interessanti vie di sviluppo per l'integrazione di sorgenti di energia (generazione locale da rinnovabili, accumulo e rete) al fine di un'ottimizzazione della taglia e della economicità dei prelievi dalle diverse fonti.

ENEA, proseguendo sulla linea di attività intrapresa nella scorsa annualità, ha approfondito l'aspetto relativo alla limitazione dell'energia prelevata dalla rete ampliando i test della stazione di ricarica integrata (caricabatterie veloce + compensatore statico). Nel report RdS/PAR2013/103 sono illustrate le prove eseguite in due diversi contesti di regolazione: compensazione di potenza reattiva e compensazione di energia reattiva/attiva. Viene inoltre indagato il saldo energetico e la domanda in potenza della stazione di ricarica integrata associata ad un campo fotovoltaico al variare del numero di veicoli in ricarica.

La stazione di ricarica rapida utilizzata è stata dotata di filtro in ingresso al fine di ridurre le armoniche in corrente che erano presenti oltre i limiti consentiti. L'intervento eseguito ha condotto ad una situazione entro i limiti ma il filtro ha prodotto un peggioramento della potenza reattiva richiesta. Questo peggioramento del fattore di potenza diviene accentuato in condizione di bassa erogazione quando il caricabatterie opera ben al disotto dei valori nominali di potenza. Il compensatore statico può fornire servizi ancillari attraverso la sua caratteristica di poter intervenire anche sulla potenza reattiva.

Al fine di implementare una procedura di compensazione di potenza reattiva a supporto della ricarica veloce di un veicolo elettrico, è stato modificato il sistema di monitoraggio e controllo per le reti energetiche implementato in Labview durante la passata annualità. Lo schema a blocchi che caratterizza il sistema studiato è indicato in Figura 511, dove viene mostrata l'interazione tra strumento di misura e sistema di controllo. Per poter implementare le logiche di compensazione della potenza reattiva descritte di seguito, è stato necessario installare un sistema di smart metering nel quadro generale dell'edificio F33 del Centro della Casaccia a monte dell'interruttore che alimenta la colonnina Chademo.

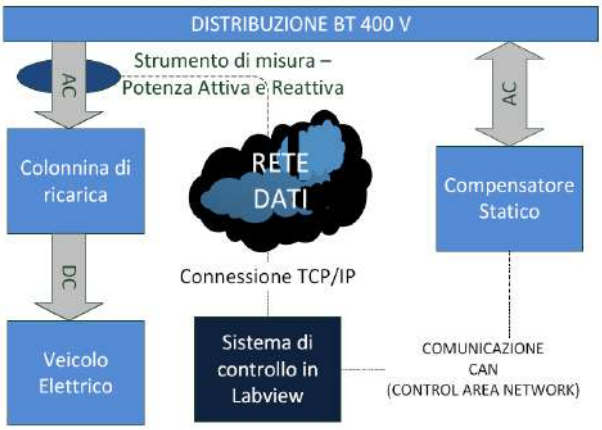


Figura 511. Schema a blocchi del sistema implementato

I nuovi servizi di compensazione reattiva implementati in Labview, prevedono due nuove logiche di controllo del compensatore. La prima logica si basa sulla compensazione della sola potenza reattiva assorbita dalla colonnina di ricarica veloce in modo da cercare di mantenere il fattore di potenza visto dal punto di consegna il più alto possibile. La seconda logica di controllo, cerca di sfruttare appieno le potenzialità del compensatore statico da 30 KVA eseguendo in via prioritaria la compensazione della potenza reattiva richiesta dalla colonnina e, se possibile, cerca di compensarne anche la richiesta di potenza attiva secondo una determinata sequenza.

Nel primo tipo di controllo la potenza reattiva viene integralmente compensata durante tutta la fase di ricarica del veicolo (Figura 512) come anche evidenziato dalla curva del fattore di potenza praticamente unitaria. In assenza dell'intervento del compensatore il cosΦ sarebbe giunto a valori molto bassi quando l'erogazione della potenza sarebbe scesa ad 1/10 del valore massimo.

La seconda strategia ha mostrato un buon risultato avendosi un incremento di potenza reattiva al decrescere della potenza attiva da parte del caricabatterie. In queste condizioni l'accumulo del compensatore è in grado di supportare tutte le richieste di potenza reattiva e di fornire anche parte della potenza attiva (Figure 513 e 514).

L'accumulo statico del compensatore alla fine delle operazioni di ricarica si trova ad un SOC del 38%.

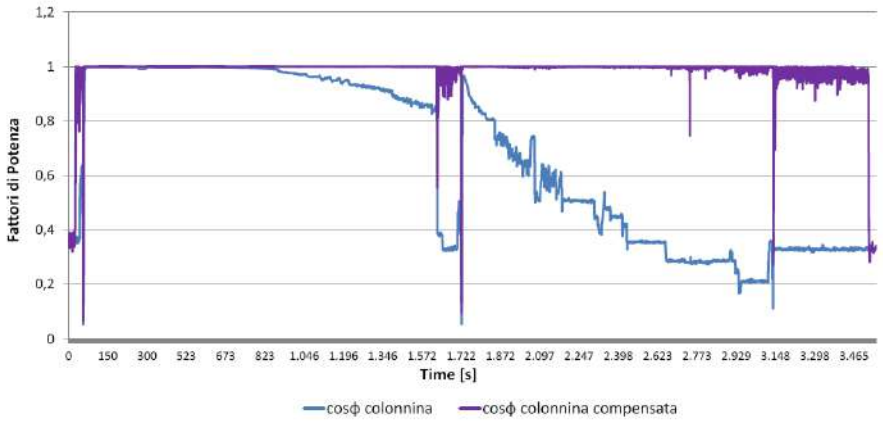


Figura 512. Fattore di potenza senza e con compensazione

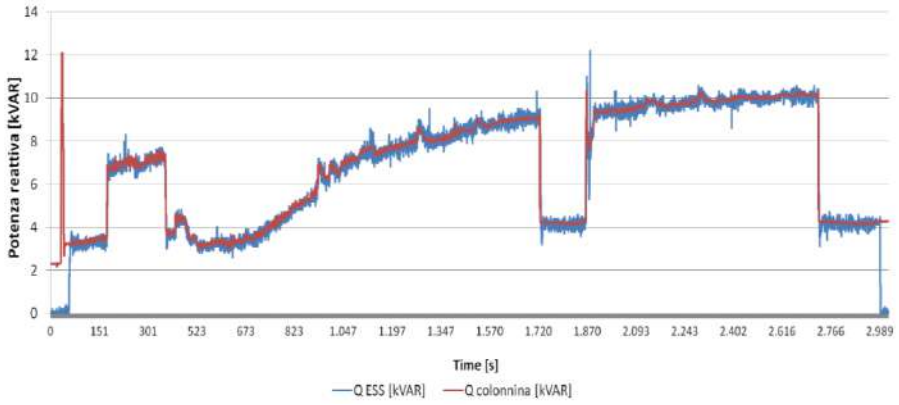


Figura 513. Potenza reattiva assorbita dal carico e fornita dal compensatore

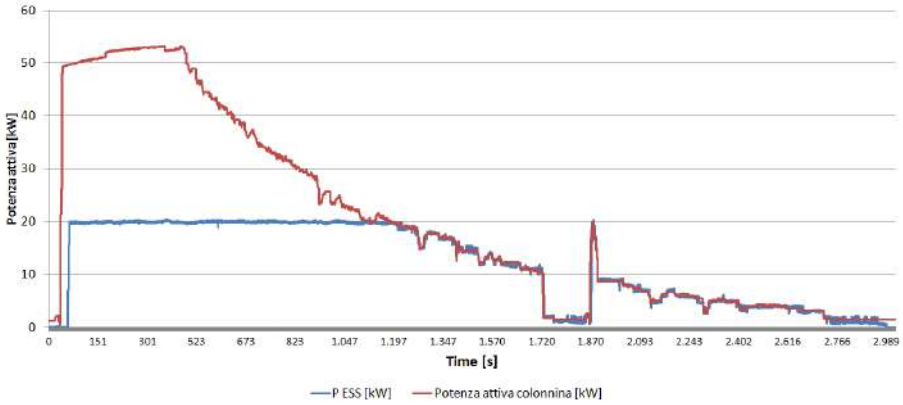


Figura 514. Potenza attiva assorbita dal carico e fornita dal compensatore

Nella precedente annualità è stata valutata l'azione di "peak shaving" imponendo una soglia di intervento del compensatore per l'erogazione della potenza attiva. La stessa prova è stata eseguita imponendo una soglia nulla ossia facendo intervenire immediatamente il compensatore nell'erogazione della potenza attiva. In questo modo si attua una azione di "load levelling" facendo in modo di far erogare parte della potenza attiva non alla rete ma all'accumulo statico che successivamente alla ricarica del veicolo può essere ricaricato. La ricarica è stata simulata tramite l'utilizzo di un campo fotovoltaico che provvede tramite il convertitore di interfaccia ac/dc del compensatore a ricaricare l'accumulo statico.

L'accoppiamento tra caricabatterie veicolo, compensatore, impianto rinnovabile e rete è un argomento di forte interesse per la determinazione delle taglie idonee per l'integrazione. Per valutare gli effetti in energia e potenza è stato studiato l'impatto di più ricariche su una stazione integrata composta da un caricabatterie rapido da 50 kW, un compensatore statico con un accumulo da 20 kW ed un impianto fotovoltaico da 7,5 kWp. La presenza dell'accumulo limita la potenza erogata dalla rete a cui va aggiunta anche la parte derivante dalla produzione rinnovabile. Alla fine della ricarica del veicolo l'accumulo stazionario viene ricaricato utilizzando l'energia della rete e del campo fotovoltaico.

La simulazione è stata condotta ipotizzando anche due ricariche al giorno, due ricariche parzialmente sovrapposte, quattro ricariche ed infine 8 ricariche distribuite casualmente nelle 24 ore. Infine si è valutato l'utilizzo di una sorgente fotovoltaica 3 volte maggiore.

Il bilancio energetico è fortemente influenzato dalla taglia del campo che immette in rete l'eccesso di energia ed è prelevabile per le operazioni di ricarica. L'accumulo contribuisce alla riduzione della potenza prelevata da rete ed è ricaricabile in modalità differita. Nel caso di una singola ricarica l'energia da PV copre per 1/3 l'energia di ricarica veicolo e per la restante parte provvede a ricaricare l'accumulo stazionario e a fornire alla rete l'eccesso di energia. L'accumulo riduce la potenza massima prelevata dalla rete di 20 kW a cui si può aggiungere il contributo dell'impianto PV che al massimo può essere di 5 kW.

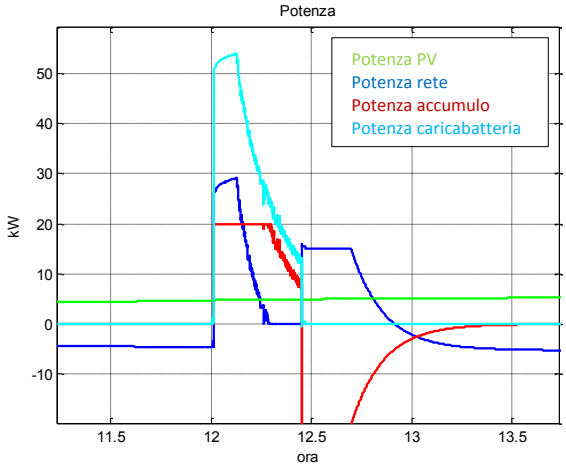


Figura 515. Potenze attive nel caso 1 sola ricarica alle ore 12.00

L'aumento della taglia dell'impianto PV passando da 7,5 a 22,5 kWp riesce a coprire l'energia necessaria per la ricarica di 8 veicoli ma la rete deve fornire il supporto necessario per l'erogazione della potenza nelle ore senza insolazione e per la ricarica dell'accumulo. Maggiore è la taglia dell'impianto minore è il ricorso alla potenza da rete consentendo un livellamento della potenza prelevata da rete in occasione delle ricariche.

b. Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti

Le attività svolte nei due Subtask approfondiscono gli aspetti dell'elettrificazione della mobilità passeggeri, sia per le autovetture, in funzione di diverse tipologie di veicoli, elettrici "puri" ed ibridi "plug-in", sia per il trasporto pubblico locale che, in una fase iniziale, avevano utilizzato valori di consumi specifico del TPL desunti da letteratura, senza approfondire le reali condizioni di operatività dei veicoli. Per lo sviluppo di queste attività ci si avvale di competenze trasportistiche ed informatiche (utilizzo di data base costituito da milioni di dati, acquistati "allo stato grezzo" a questo scopo, monitoraggio di flotte, modellazione dei consumi nelle reali condizioni di marcia) maturate in ENEA, anche nella valutazione degli impatti (in scala locale) sul sistema elettrico. La collaborazione del Politecnico di Torino invece si inserisce nella visione dell'interazione tra veicolo e rete nelle operazioni di supporto del veicolo verso la rete. Questo riveste importanza nella determinazione dell'efficacia del prelievo energetico dall'accumulo veicolare (valutazione delle perdite) ma anche degli stress sull'accumulo che potrebbero influire sulla vita utile dell'accumulo stesso.

Lo studio sugli aspetti dell'elettrificazione della mobilità è stato eseguito utilizzando dati non derivanti da sondaggi ma dati reali di spostamenti all'interno delle aree prese come sede dell'analisi. Infatti l'uso sempre più diffuso di

tecnologie satellitari GPS (Global Positioning System) ha reso possibile l'acquisizione di grandi quantità di dati spazio-temporali relativi alla mobilità, che possono essere analizzati per comprendere le abitudini sugli spostamenti degli individui durante le loro attività quotidiane. In Italia dal 2002 opera in questo settore OctoTelematics, società specializzata nella fornitura di sistemi e servizi telematici per il mercato assicurativo e automotive, che gestisce la più grande flotta telematica in Europa per numero di unità di bordo installate. Sui veicoli della flotta è installato un dispositivo chiamato Clear Box, una sorta di scatola nera contenente un ricevitore GPS, un accelerometro ed un apparato di trasmissione/ricezione GSM/GPRS per lo scambio di dati fra il dispositivo e la Centrale Multiservizi. Il sistema registra l'inizio e la fine di ogni spostamento ed i dati di posizionamento del veicolo con una frequenza di campionamento variabile (solitamente ogni due chilometri sulla rete stradale ordinaria e ogni 30 secondi sulla rete autostradale). L'ENEA ha acquisito dalla società OctoTelematics i dati grezzi di monitoraggio relativi alla provincia di Roma e per l'intero mese di Maggio 2013. I dati sono stati forniti in un unico file in formato CSV contenente 157.514.383 record relativi ad un numero di 150.633 veicoli monitorati. In Figura 517 sono rappresentati i dati di tutte le posizione GPS registrate per il giorno mercoledì 15 Maggio 2013, per i soli veicoli del campione selezionato come di seguito specificato.

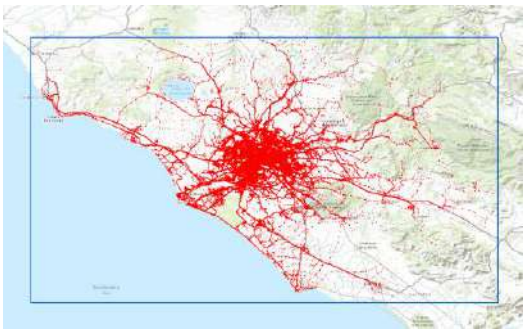


Figura 516. Il riquadro azzurro delimita l'area monitorata mentre i punti in rosso rappresentano tutte le posizioni registrate il giorno 15.5.2013, per i veicoli del campione selezionato

Il tracciato record è il seguente:

ID_term:	Identificativo univoco del dispositivo
Data Ora:	Timestamp UTC della registrazione (gg-mm-aaaa hh:mm:ss)
Latitudine:	Coordinata geografica nel sistema WGS84 in milionesimi di grado
Longitudine:	Coordinata geografica nel sistema WGS84 in milionesimi di grado
Velocità:	Velocità istantanea in km/h
Direzione:	Direzione di marcia (in gradi 0=Nord, 90=Est, 180=Sud, 270=Ovest)
Qualità:	Qualità del segnale GPS (1=non naviga, 2=2d, 3=3d)
Stato:	Stato (0=partenza, 1=moto, 2=arrivo)
DeltaPos:	Distanza in metri rispetto alla posizione del punto precedente
Strada:	Tipo strada attribuito da OctoTelematics (U=urbana, E=extraurbana, A=autostrada)

Di tutti i veicoli presenti nel database ottenuto dopo le operazioni di ripulitura dalle anomalie e la determinazione delle residenze si è selezionato un campione possibilmente omogeneo, individuando i veicoli che sono residenti all'interno del GRA (Grande Raccordo Anulare) e che non sconfinano mai, nel corso del mese, al di fuori dell'area rettangolare che circoscrive la provincia di Roma. Il campione così selezionato è quello che verrà usato in seguito ed è costituito da 16.615 veicoli, che hanno spostamenti con informazioni complete per tutto il mese di maggio 2013.

b.1 V2G gli aspetti di rete e di interfaccia di potenza, l'impatto sul sistema di accumulo

Nel favorire lo sviluppo del veicolo elettrico è certamente utile far riferimento alle recenti attività della new-economy che hanno avuto un rapido sviluppo, come quelle nel settore delle rinnovabili. Pur riconoscendo il successo ottenuto, è evidente che la rapidità con cui il fenomeno si è sviluppato ha portato anche a qualche scelta non propriamente adeguata. L'aspetto negativo nel settore delle rinnovabili è stato lo sproporzionato peso dato all'incentivo. Infatti è stato fissato a valori troppo generosi e privato di vincoli legati alle esigenze della produzione elettrica. Il primo inconveniente ha portato ad un aumento non trascurabile del costo del kWh, il secondo ad una produzione con assenza di flessibilità rispetto alle richieste orarie di energia e a quelle territoriali, generando alte

produzioni di rinnovabile in aree a bassa richiesta energetica. Ciò ha portato ai noti problemi del dispacciamento. Il conseguente sviluppo, più rapido del previsto, ha avuto come ulteriore ricaduta negativa quella di aver realizzato inizialmente un eccessivo numero di impianti ad elevati costi specifici. Diversamente, con un sviluppo più graduale, una buona parte degli impianti di prima generazione si poteva realizzare successivamente a costi più convenienti e con impianti più innovativi.

Tornando ai veicoli elettrici si riscontrano costi tendenti al ribasso con una continua evoluzione soprattutto per le batterie ed i sistemi di ricarica. Lo sviluppo di questi ultimi non riguarda solo l'aspetto tecnologico ma anche quello gestionale e logistico. Una loro diffusione eccessivamente rapida crea il rischio, per le stazioni di ricarica, di andare in disuso perché obsolete come tecnologia o perché non soddisfano, dal punto di vista dell'utenza, i requisiti gestionali o logistici.

E' comunque chiaro che visti i vantaggi, dal punto di vista energetico ed ambientale, la diffusione del veicolo elettrico deve essere senza altro favorita ma facendo tesoro degli errori del passato. In questa fase iniziale di diffusione puntare sui veicoli ibridi plug-in (PHEV) sembra presentare un più basso rischio rispetto ad uno sviluppo dei veicoli puramente elettrici (BEV). Infatti il PHEV ha batterie più modeste e soprattutto non necessita di una capillare diffusione dei sistemi di ricarica. Quest'ultimo aspetto consente di essere più cauti nel realizzare questi sistemi, oggi molto costosi, e con un alto rischio di diventare rapidamente obsoleti. Basti pensare che se la ricarica wireless dovesse diventare operativa spiazzerebbe diverse delle attuali stazioni di ricarica.

Negli Stati Uniti il mercato delle vendite, sta preferendo gli ibridi plug-in in ragione di 6 veicoli PHEV contro 4 BEV, nonostante che gli incentivi siano maggiori per i BEV, essendo legati alla capacità della batteria. Un'oculata gestione di questi incentivi potrebbe allargare ulteriormente questo divario.

E' quindi importante sapere se, nel favorire il problema energetico-ambientale, il PHEV è equivalente ad un BEV. Il primo, a priori, sembra penalizzato, per la parziale percorrenza in modalità elettrica. Questo handicap è però superato in quanto *tutti* i veicoli possono essere trasformati in PHEV, cosa non vera per veicoli BEV a meno che non si considerino i costosissimi veicoli con batterie da 80 kWh. In Figura 517, si mostrano i risultati ottenuti, da un campione di 16.615 veicoli, ipotizzando che vengano sostituiti dai 3 veicoli PHEV considerati, i quali hanno diverse autonomie come mostrato in Tabella 127.

Tabella 127.Caratteristiche dei veicoli PHEV considerati

		PHEV-10 Toyota Prius	PHEV-20 Ford Fusion Energy	PHEV-40 Chevrolet Volt
				
Capacità batteria	kWh	4,4	7,6	16
AER[1]	Miglia (km)	11 (17,7)	21 (33,8)	38 (61,2)
Consumo CD[2]	Wh/miglia (Wh/km)	288 (179)	337 (210)	342 (212)
Consumo CS[3]	gallone/miglia (litri/km)	0,0197 (0,0464)	0,0230 (0,0541)	0,0288 (0,0678)

[1] Autonomia in solo elettrico
[2] Consumo in modalità puramente elettrica
[3] Consumo utilizzando il motore a combustione



Figura 517. Percorrenze elettriche in percentuale del totale ed in km percorsi nel mese per i 3 tipi di plug-in considerati. I valori mostrati sono ottenuti con ricarica solo notturna (giallo) e con ricariche intermedie (verde)

Si vede che per la "*Volt*" (PHEV-40) si ottiene l'89,7% di percorrenza in modalità elettrica con una sola ricarica giornaliera. Potendo contare anche su ricariche intermedie si raggiungono percentuali del 96,4%. Questi risultati mostrano che il PHEV è sicuramente equivalente al BEV, se non addirittura superiore.

Ma al di là dei risultati forniti dallo studio quello che conta di più è quanto concretamente un automobilista sia disposto ad acquistare il primo o il secondo veicolo. Da questo punto di vista il PHEV è beneficiato dal garantire una più elevata autonomia e dal fatto di non creare nessun disagio per la ricarica. Inoltre grazie alla sua doppia alimentazione il PHEV può *permettersi* una ricarica più flessibile che favorisca le esigenze di rete nonché può essere in grado di restituire energia alla rete (Vehicle to Grid, V2G).

Nel presente lavoro [rapporto RdS/PAR2013/101] si è valutato quindi come il veicolo PHEV possa agevolare il problema del dispacciamento evitando di accentuarlo. Si è pertanto verificata la realizzazione di un caricabatteria in grado di far fronte a questi problemi. Per lo studio del caricabatteria si sono adottati diversi modi di funzionamento: uno con ricarica finalizzata alla sola autotrazione ed un secondo finalizzato, oltre all'autotrazione, anche alla restituzione di energia alla rete (V2G).

Tutte le tipologie di ricarica sono state confrontate con la *ricarica libera* (Mod. 1) dove la ricarica, priva di vincoli, avviene appena il veicolo ha una sosta maggiore di un'ora. Con ricarica per sola autotrazione sono stati analizzati 4 diverse modalità di funzionamento per favorire la rete, privilegiando la ricarica durante le ore di fascia bassa.

Nelle modalità 2 e 3 non è necessario conoscere l'ora di fine sosta. Nella modalità 2 si ricarica esclusivamente in fascia bassa mentre nella modalità 3 è consentita la ricarica in fascia alta ma fino al 60% mentre la ricarica completa viene effettuata in fascia bassa. In tutte e due i casi si ha una perdita di percorrenza elettrica rispetto alla ricarica libera che è sempre di modesta entità per modalità 3. In Tabella 128, si riportano i risultati ottenuti per la *Volt* (PHEV-40). Si riportano, per tipo di ricarica eseguita su un veicolo PHEV40: la percentuale di percorrenza elettrica ottenuta e quella dell'energia caricata in fascia alta, la percorrenza elettrica mensile di tutti i veicoli e quella media per veicolo, l'energia scaricata da rete per tutti i veicoli e quella media per veicolo.

Tabella 128. Risultati ottenuti su un veicolo PHEV-40

Pehv40 – Chevrolet Volt							
N° Modello	Tipo di Ricarica	Percorrenza Elettrica [%]	Energia Caricata in fascia alta [%]	Percor. Elettr. Mensile		Energia scaricata da rete nel mese	
				Tutti i veic. [km] x 10^6	Media a veic. [km]	Tutti i veic. [MWh]	Media a veic. [kWh]
1	Libera	96,4	79,1	11.66	701	2.933	176
Senza conoscenza dell'ora di fine sosta							
2	Solo fascia bassa	89,7	0,0	10.85	653	2.725	164
3	Ric. Garant.: 60%	94,9	25,5	11,48	691	2.884	174
Con conoscenza dell'ora di fine sosta							
4	Ric. Garant.: 100%	96,4	47,8	11.66	701	2.933	176
5	Ric. Garant.: 75%	95,7	20,0	11,57	696	2.907	175

Nella ultime 2 modalità occorre conoscere l'ora di fine sosta. Nella modalità 4 si ottengono le stesse percorrenze elettriche della modalità libera però con una migliore richiesta di energia in fascia bassa. Le richieste in fascia bassa aumentano ulteriormente con ricariche in modalità 5 a fronte di una modestissima riduzione della percorrenza elettrica. In questa modalità il vincolo da rispettare è di non superare durante la fascia alta la ricarica del 75%. I risultati ottenuti, sempre per la "*Volt*", sono riportati in Tabella 128.

Per la ricarica che fornisce anche il servizio V2G, per avere buoni risultati, è necessario conoscere l'orario di fine sosta. Nell'unica modalità analizzata si riscontra che se i veicoli campione venissero sostituiti da veicoli PHEV-10, con batteria di 4,4 kWh, la rete non dovrebbe erogare nulla in fascia alta. Infatti l'energia che verrebbe restituita alla rete con il servizio V2G, durante la fascia alta, è sufficiente a soddisfare tutte le richieste dei veicoli che si ricaricano proprio in quelle ore. In sostanza si riesce a far circolare tutti i PHEV-10 con le stesse percorrenze della ricarica libera e la rete globalmente assorbe energia solo in fascia bassa. Diversamente con i PHEV-40, grazie alla generosa batteria da 16 kWh, in fascia alta si riesce a fornire alla rete anche una potenza media a veicolo di almeno 300 W, oltre a soddisfare le richieste di ricarica provenienti dai veicoli.

I risultati ottenuti sono applicati sul carico di rete rilevato da Terna il terzo mercoledì di maggio 2013, in verde in Figura 518. Alcuni autori prevedono nel 2030 una penetrazione del veicolo elettrico del 17%, sull'attuale parco veicolare italiano. Se si ipotizza che tutti questi veicoli siano equamente suddivisi in PHEV-10, PHEV-20 e PHEV-40 il carico aumenterebbe secondo le 3 curve punteggiate che rappresentano la ricarica libera (nera), quella secondo

il Modello 4 (rossa) o con ricarica V2G (blu). La curva continua blu, in modo più realistico, considera che un solo 20% dei veicoli previsti nel 2030 adotti la ricarica con servizio V2G.

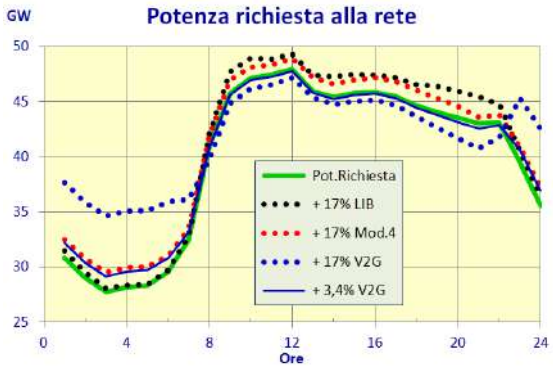


Figura 518. Andamento della potenza richiesta alla rete italiana il 15 maggio 2013

La necessità di avere capacità di accumulo è tra i principali aspetti del processo di profonda trasformazione che sta interessando le reti elettriche (dalle microreti alle reti di trasmissione); in questo contesto la gestione intelligente della ricarica dei veicoli costituisce un tema d'innovazione che vede potenziali vantaggi per la rete sia in termini di adattabilità della domanda sia in termini di stoccaggio distribuito. Tuttavia, a fronte dei potenziali vantaggi lato rete, la gestione della ricarica in prospettiva V2G (flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete), comporta non solo l'uso di un convertitore bidirezionale (quindi più complesso rispetto al caricabatteria convenzionale), ma anche la necessità di gestire i flussi di carica-scarica in modo energeticamente ottimale, nel rispetto dei vincoli derivanti sia dalle esigenze di disponibilità e impiego del veicolo sia dai livelli massimi di corrente e potenza che limitino gli effetti di invecchiamento dell'accumulatore elettrochimico di bordo. E' in questo ambito che si colloca l'attività di sviluppo di uno strumento di simulazione basato su un modello energetico parametrizzato che consenta di determinare le perdite e i rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di ricarica con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. L'obiettivo dello strumento è fornire sia indicazioni quantitative di "convenienza" energetica della soluzione V2G, sia indicazioni utili all'ottimizzazione energetica dei convertitori bidirezionali per la ricarica del veicolo (ad esempio per quali punti di funzionamento massimizzare il rendimento).

Si è stato scelto di basare la modellistica energetica del caricabatteria bidirezionale e dell'accumulatore elettrochimico sull'impiego di mappe di efficienza energetica di diversa complessità e risoluzione allo scopo di potersi adattare ai livelli di conoscenza disponibili per i sistemi che di volta in volta si intende simulare (l'utilizzo di schemi elettrici circuitali richiede la conoscenza del valori dei componenti e dei parametri che molto spesso non sono disponibili). Le mappature energetiche sono di tipo parametrico e modulare in modo da poter essere estese a diverse taglie di batteria e convertitore (monofase o trifase); inoltre, coerentemente con le dinamiche di campionamento dei profili di carico delle reti, i profili energetici di carica/scarica implementabili sono di tipo a bassa dinamica rispetto alle costanti di tempo tipiche dei fenomeni elettrici, elettronici ed elettrochimici, e la dinamica della rete non è inclusa nel modello (tensione di rete costante). Il modello è implementato in ambiente MATLAB/Simulink, dove le mappe sono costituite da *look-up tables* che possono essere generate a partire da dati di letteratura, data sheet forniti dai produttori, modelli circuitali di dettaglio o rilievi sperimentali, dipendentemente dalle informazioni disponibili. In Figura 519 lo schema di principio del modello energetico sviluppato.

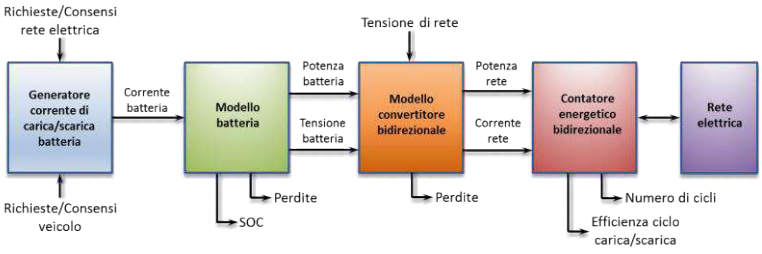


Figura 519. Schema di principio del modello energetico sviluppato

Sulla base delle richieste e dei consensi da parte della rete elettrica e del veicolo collegato, il simulatore determina la corrente di carica/scarica della batteria tenendo in considerazione i limiti operativi di funzionamento delle batterie (ad esempio fissando il limite massimo e minimo di stato carica).

Per ciascun ciclo completo di carica/scarica della batteria il simulatore valuta le perdite energetiche della batteria e del convertitore. La batteria è modellizzata dalle curve di tensione in funzione dello stato carica per i diversi valori di corrente durante la carica e la scarica. Inoltre il modello tiene conto dell'invecchiamento della batteria riducendone progressivamente la capacità ciclo dopo ciclo. Il numero di cicli eseguiti e l'efficienza energetica per ciascun ciclo completo di carica/scarica della batteria sono valutati per mezzo del contatore energetico bidirezionale.

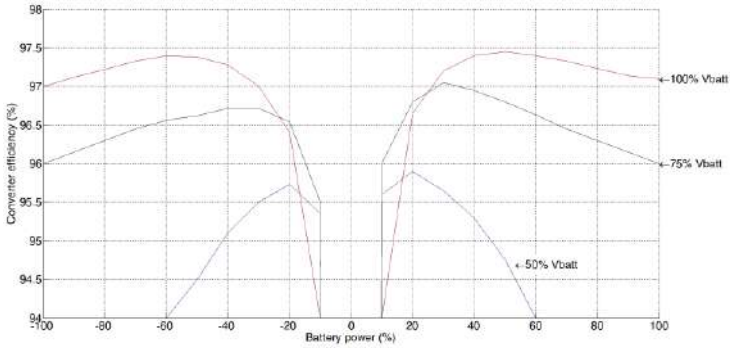


Figura 520. Curve di rendimento convertitore elettronico di potenza bidirezionale (le curve sono parametrizzate rispetto alla tensione di batteria)

Impostato il profilo di corrente con cui la batteria di bordo assorbe/restituisce energia alla linea, il modello consente di determinare gli andamenti della tensione di batteria, della potenza scambiata alla presa di rete o ai morsetti di batteria, quindi per differenza l'andamento delle perdite. Nel caso di cicli in cui lo stato carica iniziale e finale dell'accumulatore coincidano, si determina il rendimento energetico inteso come il rapporto tra l'energia riversata in rete e quella assorbita dalla rete.

Programmato il diagramma di carico della rete, ad esempio un andamento giornaliero, è possibile inserire le soglie per l'attivazione della carica/scarica: tipicamente per richiedere al veicolo di assorbire dalla rete in corrispondenza di valori di carico bassi o negativi, e per richiedere di generare verso la rete, in concomitanza con i picchi di carico. Definiti in questo modo gli intervalli di carica/scarica, il modello restituisce i valori di energia scambiata tra rete e veicolo. Il simulatore consente pertanto di determinare, note le caratteristiche energetiche di un dato sistema di ricarica, come al variare del regime di carica scarica si modifichino perdite ed efficienza complessiva, e quindi valutare la convenienza energetica della funzionalità V2G. Al contrario, fissata la modalità di carica/scarica il simulatore consente di determinare le perdite e l'efficienza complessiva al variare della taglia e delle caratteristiche energetiche del convertitore e della batteria. Infine, le informazioni ed i dati prodotti dal modello, se abbinati a dati tariffari, consentiranno di valutare la convenienza economica vista dal *prosumer* (il veicolo è sia utilizzatore che generatore) e/o dal gestore della rete.

b.2 Studio della sensibilità della conversione in elettrico del trasporto pubblico

L'attività condotta rappresenta il naturale proseguimento ed approfondimento delle analisi effettuate nel corso della precedente annualità della RdS, relative alla fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione dei servizi di Trasporto Pubblico Locale.

I risultati del primo anno, relativi ad uno studio focalizzato su due diversi sottoinsiemi della rete di trasporto pubblico di Roma, avevano dimostrato che, sull'intero arco della vita utile dei mezzi, considerando anche i benefici ambientali conseguenti, l'elettrificazione di una rete di trasporto pubblico è economicamente conveniente, specie sfruttando le opportunità offerte dai sistemi di ricarica rapida, grazie alle quali è possibile ridurre i costi complessivi di investimento (come somma dei costi di acquisto dei veicoli elettrici e di istallazione dei sistemi di ricarica ai capolinea o alle fermate). In quella fase, lo studio aveva utilizzato valori di consumo specifico dei mezzi desunti da letteratura, senza approfondire le reali condizioni di operatività dei veicoli. La presente analisi, invece, ha previsto una consistente quota di attività dedicata a questo importante aspetto [rapporto RdS/PAR2013/102].

Come caso di studio sono state selezionate alcune linee del servizio di trasporto pubblico nel Comune de l'Aquila, la cui Amministrazione ha aderito all'implementazione di progetti dimostrativi di Smart Cities, all'interno dei quali rientrano iniziative di elettrificazione del trasporto su strada e, congiuntamente, di diffusione di sistemi ICT applicati ai trasporti, per una gestione ottimizzata e più efficiente dell'offerta.

Le linee di trasporto pubblico su cui eseguire l'analisi di elettrificazione sono state individuate sulla base della dimensione dei mezzi attualmente utilizzati dall'AMA (Azienda Trasporti de L'Aquila) per effettuare il servizio: sono state selezionate due linee servite da veicoli di ridotte dimensioni (Cacciamali TCC635L), così da poter sfruttare dati relativi a precedenti rilevazioni sul minibus Gulliver della Tecnobus in dotazione al C.R. ENEA Casaccia.

Più specificatamente, le linee selezionate sono la 10 e la 12A: la prima ha un percorso di circa 11 km sulla tratta Terminal Collemaggio-Bagno Grande; la seconda ha una lunghezza di circa 22 km nella tratta Terminal Collemaggio-Foce di Sassa. La Figura 521 mostra i percorsi completi delle linee prescelte. Tali percorsi si completano con le tratte di trasferimento del veicolo dal Deposito Aziendale ai Capolinea, e viceversa, previsti ad ogni inizio e fine turno del personale di guida.

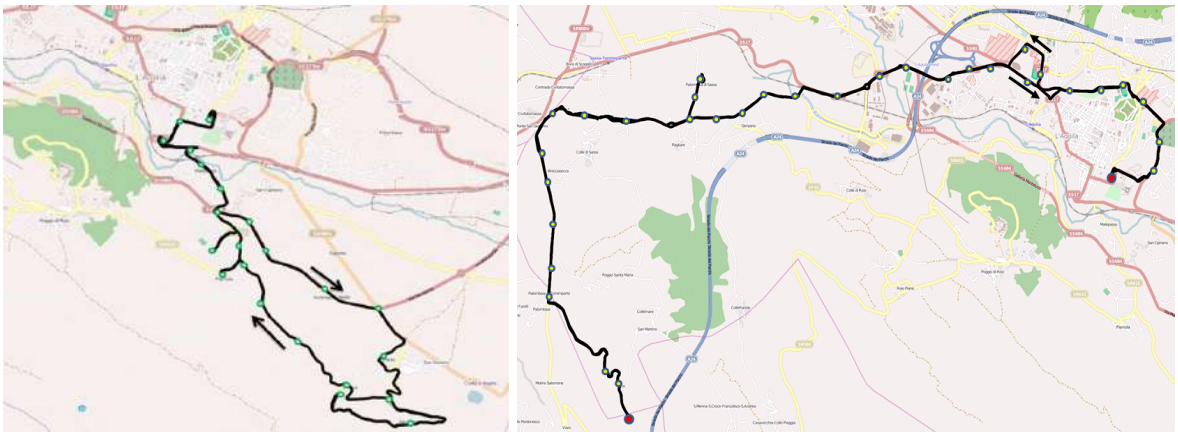


Figura 521. Percorsi delle linee "10" e "12 A" dell'AMA de l'Aquila

Il nuovo caso di studio, molto differente da quello esaminato l'anno precedente per condizioni di esercizio e tipologia di veicoli utilizzati, ha dato modo di estendere le verifiche di fattibilità dell'elettrificazione ad altri contesti che non linee in servizio prettamente urbano.

La metodologia di analisi ha previsto il confronto fra i dati di consumo acquisiti durante una campagna di rilevamento nelle reali condizioni di esercizio del veicolo Cacciamali, appositamente effettuata a L'Aquila con la fattiva e preziosa collaborazione dell'AMA, e i risultati delle simulazioni relative alle prestazioni del Gulliver Tecnobus nelle medesime condizioni di esercizio. Ciò ha richiesto che durante la campagna di rilevamento fossero acquisiti con adeguata strumentazione anche tutti i dati necessari a ricostruire il profilo cinematico realizzato durante le missioni di servizio (Figura 522a titolo esemplificativo).

Le simulazioni della trazione in elettrico sono state rese possibili grazie alla messa a punto di un software *ad hoc*, calibrato utilizzando i dati della campagna sperimentale realizzata in passato nel C.R. ENEA Casaccia con il Gulliver Tecnobus. il modello informatizzato restituisce, *step by step*, i valori di consumo del veicolo elettrico, la potenza impegnata e lo stato di carica della batteria, rendendo possibile il dimensionamento del sistema di trazione necessario per il profilo di missione assegnato.

I risultati delle simulazioni hanno evidenziato che, per portare a compimento la missione assegnata, è necessario aumentare la potenza del motore e la capacità del sistema di accumulo del veicolo elettrico rispetto ai valori del Gulliver attualmente in commercio (Tabella 129); l'impiego di batterie agli ioni di litio, tuttavia, fa sì che questo non comporti un aumento di peso del veicolo ne' una riduzione di capacità dello stesso.

Inoltre, per venire incontro agli elevati assorbimenti di energia dovuti ai particolari ed impegnativi profili cinematici delle missioni analizzate, si deve prevedere la possibilità di ricaricare le batterie durante le soste programmate nel corso del servizio giornaliero del veicolo, installando adeguati sistemi di erogazione di energia ad elevata potenza (50 kW); in alcuni casi è necessario anche prolungare leggermente i tempi di sosta o inserire nuove brevi soste, senza che ciò, tuttavia, pregiudichi l'efficacia del servizio di trasporto.

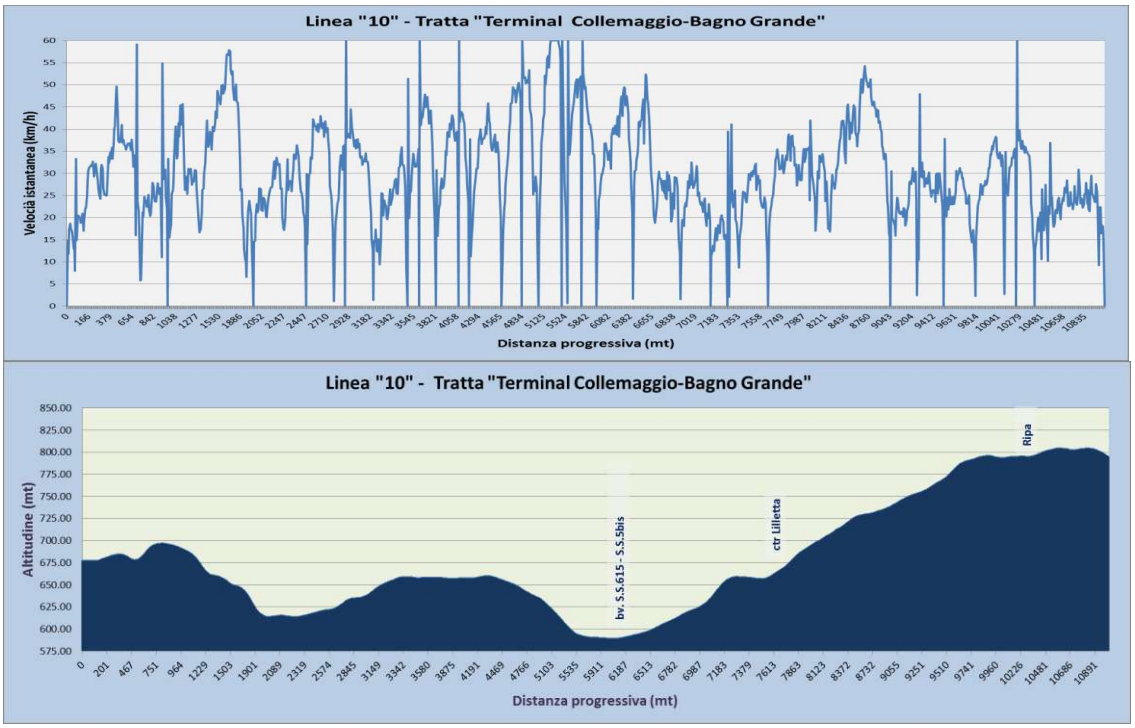


Figura 522. Parametri cinematici del percorso di andata della linea "10"

Tabella 129. Specifiche del sistema di accumulo del Tecnobus Gulliver U520esp modificato

Tecnologia Batteria	$LiFePO_4$
Capacità nominale	100 Ah
Tensione nominale di cella	3,2V
Celle in serie	128
Celle in parallelo	1
Tensione nominale	409.6
Energia nominale	40,96 kWh

In sostanza, con i dovuti accorgimenti tecnologici e gestionali, si dimostra la possibilità tecnica di sostituire gli attuali veicoli ad alimentazione diesel con veicoli elettrici di analoghe prestazioni.

La fattibilità economica di tale sostituzione è stata verificata per due diversi soggetti interessati:

- l'Azienda di Trasporto, che si farebbe carico di notevoli oneri finanziari aggiuntivi nelle fasi di investimento rispetto all'acquisto di un nuovo veicolo convenzionale, beneficiando però di una sostanziale riduzione dei costi operativi durante la vita utile del mezzo;
- la collettività, in senso ampio, la quale dovrebbe sostenere anch'essa maggiori esborsi iniziali in Conto Capitale, a fronte di una riduzione sia delle spese correnti – più contenuta che per l'Azienda – sia dei costi delle esternalità ambientali.

In entrambi i casi l'analisi ha dato risultati positivi, evidenziando che nell'arco della vita utile del veicolo è più conveniente ricorrere alla trazione elettrica piuttosto che al motore diesel, nonostante la necessità di impiegare pacchi batteria di notevoli capacità e di installare sistemi di ricarica rapida ad elevata intensità di corrente.

Tabella 130. Indicatori di redditività dell'acquisto del bus elettrico

Scenario di base	Impresa	Collettività
VAN	9.095 €	3.743 €
B/C	1,05	1,02
TIR	7,5%	4,3%

La redditività economica potrebbe addirittura migliorare in un non improbabile scenario di ulteriore aumento dei prezzi dell'energia e se una maggiore diffusione sul mercato della trazione puramente elettrica facesse ridurre i prezzi di listino attuali, indubbiamente elevati rispetto a quelli relativi ai mezzi convenzionali.

Viceversa, è necessario garantire un impiego intensivo dei mezzi, al fine di garantire un rientro sufficientemente veloce degli investimenti iniziali che altrimenti potrebbe non verificarsi; si sottolinea come, per questo aspetto, i servizi di trasporto extraurbani sia preferibili a quelli urbani, sovvertendo un luogo comune secondo cui i veicoli elettrici siano utilizzabili solo in ambito urbano. Naturalmente ciò si rende possibile tecnicamente solo grazie ai progressi nelle prestazioni dei veicoli a batteria e dei sistemi di ricarica.

c. Collaborazioni Internazionali, comunicazione e diffusione dei risultati

Le attività di collaborazione con i principali stakeholder nazionali e internazionali, complementate dalle attività di comunicazione e diffusione dei risultati sia verso il mondo accademico che nell'opinione pubblica, sono state numerose ed importanti, come di seguito illustrato in dettaglio.

Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali – EVI - IA HEV - AVERE

L'attività ha riguardato la partecipazione attiva ad alcune iniziative internazionali sui veicoli elettrici ed ibridi 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. Inoltre l'ENEA è attiva nel board dell'Associazione europea veicoli elettrici stradali (AVERE).

Pertanto le principali partecipazioni a gruppi di lavoro internazionali hanno riguardato:

1. EVI (Electric Vehicle Initiative)
2. Implementing Agreement (IA) HEV (Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes) dell'International Energy Agency (IEA)
3. AVERE

La partecipazione alle attività dell'EVI (Electric Vehicle Initiative)

Su richiesta del Ministero dello Sviluppo Economico (MSE), è continuata la partecipazione italiana, avviata nel 2011, 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, a cui partecipano 23 governi con diversi ministeri (l'Italia partecipa con il Ministero dello Sviluppo Economico e con quello dell'Ambiente) mirano a ridurre le emissioni, a migliorare la sicurezza energetica, facilitare l'accesso alle risorse energetiche pulite e sostenere lo sviluppo economico.

All'EVI partecipano attualmente 16 nazioni (Cina, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, India, Giappone, Italia, Olanda, Portogallo, Regno Unito, Spagna, Svezia, Stati Uniti, Sud Africa). La IEA svolge le funzioni di segreteria e coordina la raccolta, l'analisi e la diffusione dei dati EVI.

Nell'ultimo anno, le attività sono state numerose e hanno riguardato la raccolta ed analisi dell'informazioni, anche, in collaborazione con l'IA IEA sui veicoli elettrici ed ibridi con cui spesso si svolgono riunioni congiunte.

- A novembre 2013, si è svolto a Barcellona, in concomitanza con la riunione del Comitato esecutivo dell'IEA HEV e del convegno mondiale sui veicoli elettrici EVS-27 (per ottimizzare i costi di viaggio e garantire maggiore partecipazione), un incontro congiunto tra EVI e ISGAN (International Smart Grid Action Network dell'IEA, nata sotto l'iniziativa CEM) per avviare una collaborazione relativa ai problemi associati alla connessione alle reti elettriche dei veicoli elettrici. Un documento preliminare è stato redatto per meglio definite gli scopi del lavoro comune.

  Nel corso dell'incontro è stata diffusa la versione finale del Global EV, un rapporto che raccoglie le principali iniziative di introduzione dei veicoli elettrici in 15 paesi, che rappresentano circa il 90% dei veicoli elettrici in circolazione nel 2012. L'ENEA ha contribuito con dati relativi alle infrastrutture di ricarica ed al parco circolante, con alcune informazioni sugli incentivi in corso.
- Alla fine del 2013 è stato anche avviato l'aggiornamento dell'*EV City Casebook*, a un elenco delle città e delle regioni più virtuose, a livello mondiale, nell'attuare iniziative politiche di maggiore efficacia per accrescere l'uso e la percentuale di veicoli elettrici in circolazione.

- EVI, insieme ad altri gruppi, ha lanciato il portale web *World EV Cities and Ecosystems* (worldevcities.org), che consente di mettere a disposizioni tutte le informazioni pubbliche su programmi, progetti, politiche, esperienze e casi di successi.
- Infine EVI e l'IA IEA HEV hanno firmato una Lettera di Intenti per rendere complementari, integrare i rispettivi sforzi ed aumentare lo scambio di informazioni sulle attività relative all'uso nelle città e ai migliori esempi applicativi di veicoli elettrici.
- Nella riunione di maggio 2014, che si è tenuta a Copenaghen, a cui l'ENEA non ha partecipato, la Norvegia ha fatto il suo ingresso ufficiale in EVI, portando a 17 membri la partecipazione. Inoltre è stato concordato il piano di lavoro per il 2014 e 2015.

Un aspetto in corso di valutazione con il Ministero dello Sviluppo Economico è l'opportunità e modalità di un contributo economico, sollecitato dall'IEA per poter garantire il prosieguo dell'azioni di segretariato e di coordinamento di EVI (il costo complessivo annuo IEA per questa azione è valutato in circa 110.000 €).

Implementing Agreement (IA) HEV

Nell'ultimo anno, è proseguita la partecipazione attiva alle attività dell'IEA su "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes". In questo periodo sono state concordate e realizzate alcune modifiche e iniziative importanti, che hanno riguardato:

- le modalità di funzionamento. Il contributo per il fondo comune e per le attività del Comitato Esecutivo è stato modificato con delle fasce di partecipazione che rendono automatica ed a costo zero la partecipazione ai Task che prevedono un costo di gestione del Coordinatore.
- la prosecuzione dell'IA. Il Comitato Esecutivo, su proposta del Chairman e della Segreteria e dello special Gruppo di lavoro "Strategia", ha approvato la bozza del documento strategico che è alla base della richiesta di estensione, per ulteriori 5 anni, dell'IA. Tale documento è stato poi trasmesso agli organi decisionali dell'IEA.

Tra le principali attività svolte dall'ENEA, sono da ricordare tra le principali:

- la redazione del Rapporto Annuale, contenente un ampio aggiornamento sullo stato dei programmi e della diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi nel mondo;
- la revisione del programma sperimentale per la verifica dei protocolli di invecchiamento delle batterie al litio, coordinato dall'ENEA; che fanno capo al Task 21;
- l'ENEA, in qualità di vicepresidente dell'Accordo, partecipa direttamente alla gestione e al controllo e monitoraggio delle attività e dei programmi svolti nei vari paesi partecipanti;
- la partecipazione alle riunioni collegiali del Comitato Esecutivo (ExCo) in Spagna (Barcellona), a Novembre 2013, e in Danimarca (Copenaghen) a maggio 2014, a cui l'ENEA non ha partecipato;
- i paesi partecipanti nell'ultimo anno sono aumentati. 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 dello scambio di informazioni all'analisi del mercato e delle tecnologie.

Le attività di collaborazione, con diversa livello di partecipazione, sono svolte all'interno di programmi di lavoro congiunto, denominati Task. Attualmente sono attivi i seguenti Task:

- Task 1, Information Exchange
- Task 10, Electrochemical Systems
- Task 17, System Optimization & Vehicle Integration
- Task 18, EV Ecosystems
- Task 19, Life Cycle Assessment of Evs
- Task 20, Quick Charging
- Task 21, Accelerated Ageing Testing for Li-ion Batteries
- Task 22, E-Mobility Business Models
- Task 23, Light-Electric-Vehicle Parking and Charging Infrastructure
- Task 24, Economic Impact Assessment of E-Mobility
- Task 25, Plug-in Electric Vehicles
- Task 26, Wireless Power Transfer for Evs
- Task 27, Electrification of transport logistic vehicles (eLogV)
- Task 28, Home grids and V2X technologies.

L'ENEA partecipa ai seguenti 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 state organizzate 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. Una riunione sull'effetto della ricarica rapida è stato programmato per settembre 2014 a Nizza.

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 svolte nel 2013-2014 hanno riguardato la revisione del piano di lavoro per attrarre ulteriori partecipanti. Inoltre è stata analizzata la possibilità di espandere questo Task in un progetto più ampio nell'ambito di un Call sui Trasporti della Commissione Europea che si è chiuso il 28 agosto 2014.

Nell'ultimo anno, sono stati anche realizzati alcuni prodotti di ampia diffusione, l'ENEA ha partecipato alla stesura il Rapporto Annuale 2013, con la preparazione di una sintesi sullo stato dell'arte delle attività nazionali sui veicoli elettrici e sullo stato del mercato corrispondente. Il rapporto viene distribuito in formato cartaceo e reso disponibile sul sito dell'IA. Inoltre è stato aggiornato l'Outlook 2013 sulle prospettive di diffusione dei veicoli elettrici.

La partecipazione alle attività dell'AVERE

ENEA ha partecipato alle attività del Board AVERE ed a quelle svolte per l'organizzazione della Conferenza mondiale sui veicoli elettrici (EVS-27, Electric Vehicle Symposium). In particolare, per l'organizzazione dell'EVS-27 sono state svolte diverse attività in conseguenza della partecipazione al Comitato Scientifico Internazionale: revisione degli abstracts e dei lavori finali presentati alla Sessione condotta dall'ENEA.

Pubblicazioni e mostre

Le azioni di diffusione dei risultati sono state operate negli ambiti scientifici attraverso la pubblicazione di memorie su riviste internazionali e tramite la partecipazione a convegni. Per ampliare la platea dei soggetti che possano fruire dei risultati delle ricerche portate avanti si sono considerate anche le presentazioni ad eventi maggiormente indirizzati verso il largo pubblico.

Ecomondo 2013

ENEA ha partecipato alla 17^{a} edizione dell'evento tenutosi a Rimini dal 6 al 9 novembre 2013. Ecomondo, Fiera Internazionale del Recupero di Materia ed Energia e dello Sviluppo Sostenibile, importante fiera nazionale dedicata ai temi della Green Econom .

La partecipazione dell'ENEA si è svolta nell'ambito di "H2R - Mobility for sustainability" che, come tutte le edizioni precedenti, è stato promosso dal CNR - Istituto di tecnologie avanzate per l´energia, dall'ENEA e dal Centro Interuniversitario per lo Sviluppo sostenibile (CIRPS) della Sapienza Università di Roma. La manifestazione, tenutasi a Roma per undici edizioni, nel 2013 è stata associata ad Ecomondo.



Grazie alla posizione centrale riservata alla manifestazione nella prestigiosa "Hall Sud" della Fiera di Rimini, l´area espositiva, le conferenze e i convegni di H2R MObility for sustainability hanno richiamato l´attenzione degli oltre 90.000 visitatori di Ecomondo. ENEA ha esposto le sue proposte per la mobilità sostenibile in uno stand da 40 m^2, con la presentazione di soluzioni per la mobilità individuale da città, per il trasporto merci, per veicoli da trasporto collettivo, per la logistica, la sicurezza e l'infomobilità, raccolte in una pubblicazione specifica.

Nella brochure distribuita vengono considerati sia gli aspetti della mobilità individuale che quelli del trasporto pubblico locale che il trasporto merci, con la presentazione di sistemi per l'infomobilità e per la gestione della distribuzione delle merci, di motorizzazioni elettriche, ibride e che utilizzano combustibili a ridotto impatto ambientale, di componenti e sistemi per la mobilità elettrica. In particolare due schede illustrano attività svolte in ambito Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale 2012-2014, con una scheda dedicata a batterie litio-ioni con caratteristiche di modularità molto spinte in termini di gestione della ricarica (equalizzazione) e termica ed una dedicata alla ricarica rapida. La scheda sviluppa sia il tema della ricarica in corrente continua, direttamente alle batterie del mezzo, che quello della ricarica in alternata, che richiede un caricabatteria di bordo, qui derivato dallo stesso azionamento del veicolo.

ECOMM 2014



L'ENEA ha partecipato all' "European Conference On Mobility Management" (ECOMM), che si è tenuta dal 7 al 9 maggio 2014 a Firenze con un proprio stand.

La conferenza annuale costituisce un'occasione per le aziende e le istituzioni di formazione ed aggiornamento sul tema della mobilità sostenibile. Prevede oltre 20 sessioni di lavoro e una parte espositiva dove istituzioni e aziende presentano i loro prodotti per una mobilità più ecosostenibile.

Nello stand ENEA sono stati esposti poster che illustravano i risultati di attività, svolte nell'ambito della Ricerca del Sistema Elettrico finalizzate a sviluppare tecnologie innovative per una mobilità più sostenibile.

Isola della sostenibilità 2014

Nei giorni 10-12 settembre sull'antica isola Tiberina a Roma si è tenuto l'evento "Isola della sostenibilità" un meeting sugli argomenti relativi alla green economy. L'isola si è trasformata in un spazio pubblico di opinioni sede di convention, workshop, eventi culturali su un tema molto importante: la sostenibilità.

Una serata è stata dedicata al temi della mobilità e dei trasporti nella visione di una trasformazione delle attuali modalità fortemente invasive nei confronti dell'ambiente verso tecnologie dichiaratamente meno energivore e più efficienti. L'ENEA ha partecipato alla sessione sui trasporti fornendo utili indicazione sullo stato dell'arte delle tecnologie veicolari elettriche ed ibride e sulle potenzialità di penetrazione nel nostro utilizzo quotidiano. In particolare sono stati illustrati i risultati conseguiti entro le attività della Ricerca di Sistema relativamente agli sviluppi della ricarica rapida, sia conduttiva che induttiva, oltre alla considerazioni in merito alla potenzialità della diffusione del veicolo elettrico/ibrido nella Città di Roma come indicato nei Report RdS/PAR2013/133.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

La realizzazione del progetto "Prodotti e Processi per il Miglioramento dell'Efficienza Energetica nell'Elettromobilità" ha coinvolto tre soggetti co-beneficiari: Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Università di Padova ed Politecnico di Torino.

Università di Cassino, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione

L'Università di Cassino (UNICLAM) per l'Obiettivo a - subtask a.2 ha svolto una ricerca dal titolo "Progettazione e studio di un convertitore per stazione di ricarica rapida in c.c. con accumulo elettrico stazionario, per l'integrazione nel sistema dei trasporti di E.E. da fonti rinnovabili non programmabili". Il sistema di conversione oggetto dell'attività di ricerca è basato su una struttura modulare, che consente di interfacciare un'infrastruttura di ricarica per veicoli elettrici anche complessa con diverse sorgenti di alimentazione e sistemi di accumulo combinati. L'obiettivo è ottimizzare i flussi di potenza per diminuire o, addirittura, annullare l'impatto dell'infrastruttura sulla rete elettrica di distribuzione. La ricerca svolta si è concentrata non solo su una possibile implementazione di un convertitore innovativo ad alta efficienza ma, più in generale, sulla progettazione di una piattaforma numerica che, in funzione delle specifiche relative alle sorgenti di alimentazione e alle esigenze di carico, consentisse di:

- dimensionare la taglia delle singole unità del convertitore;
- definire la migliore tipologia di convertitore in funzione dell'efficienza di conversione complessiva;
- dimensionare il sistema di accumulo energetico;
- dimensionare l'eventuale sistema di generazione da fonte rinnovabile (principalmente fotovoltaico);
- definire istante per istante i flussi di potenza ottimali.

Tale obiettivo è stato raggiunto grazie alla definizione di una "funzione di ottimo" che tenesse conto di molteplici fattori, quali: costo dell'energia elettrica in funzione della fascia oraria, costo e usura del sistema di accumulo, costo e disponibilità della fonte rinnovabile, costo del convertitore in funzione della sua tipologia e della sua efficienza, profili di assorbimento del carico, piano di ammortamento di tutto l'impianto. Attraverso la definizione dei possibili scenari di costo e utilizzo, si è proceduto ad effettuare diverse simulazioni che, caso per caso, hanno dato come risultato il progetto di massima del convertitore ideale da utilizzare per quella specifica applicazione (in termini di singole unità di conversione, taglia, tipologia, ecc.) e l'impostazione dei flussi di potenza del convertitore, utili ad ottenere il migliore piano di ammortamento dell'investimento iniziale dell'impianto. La piattaforma realizzata è costituita da due "*layer*" di simulazione, funzione delle diverse costanti di tempo presenti nel sistema complesso. I *layer* sono interlacciati fra loro mediante un sistema di tipo ricorsivo, che consente di disaccoppiare le dinamiche e velocizzare il processo di simulazione e, quindi, di dimensionamento.

La piattaforma può così essere utilizzata sia per analisi ex-ante (progettazione e dimensionamento di impianti nuovi), che ex-post (verifica delle prestazioni e calcolo dei piani di ammortamento di impianti già esistenti). Inoltre, modificando le variabili di sistema, è anche possibile calcolare il gap che sussiste fra i costi attuali dei vari componenti dell'impianto (soprattutto batterie e fotovoltaico) e quelli che permetterebbero di avere un ritorno economico dell'investimento iniziale in un tempo di ammortamento stabilito. Tale possibilità riveste sicuramente un notevole interesse nella definizione di possibili piani di incentivazione economica o nella pianificazione di opportune strategie di sviluppo legate alla mobilità elettrica.

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

Il Politecnico di Torino per l'Obiettivo b - subtask b.1 ha svolto una ricerca dal titolo "Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid". L'introduzione di strategie di gestione intelligente delle reti elettriche permette la possibilità di un utilizzo ottimale di veicoli elettrici da un punto di vista di sistemi di immagazzinamento distribuito. Infatti, la presenza di batterie ricaricabili a bordo veicolo rappresenta la disponibilità di sistemi di accumulo distribuiti che possono essere opportunamente sfruttati in una prospettiva di gestione intelligente delle reti elettriche, secondo il concetto di *vehicle-to-grid* (V2G). Nelle applicazioni V2G, il caricabatteria deve poter permettere il flusso di energia bidirezionale, ovvero sia dalla rete al veicolo sia dal veicolo alla rete; ciò comporta una maggior complessità circuitale dello stesso e l'impiego di componenti caratterizzati da un costo maggiore rispetto a quelli che possono essere impiegati per un caricabatteria unidirezionale. Lo scenario caratterizzante il concetto V2G è basato sulla dislocazione di opportune tecnologie che permettono il trasferimento di energia elettrica dalla rete al veicolo e viceversa. I veicoli elettrici con tecnologia V2G sono caratterizzati dalla possibilità di essere connessi alla rete elettrica per essere ricaricati, ed allo stesso tempo di poter comunicare con il sistema di gestione della rete stessa.

Dal punto di vista della rete, i veicoli dotati di tecnologia V2G rappresentano una sorgente di generazione distribuita che può essere sfruttata durante i picchi di assorbimento, contribuendo così a ottundere il profilo di potenza e ad incrementare il fattore di carico, con un conseguente aumento della resilienza della rete. Tal riduzione della discrepanza tra domanda ed offerta di energia elettrica è di rilevante importanza anche da un punto di vista ambientale; infatti, l'insieme di più veicoli elettrici connessi alla rete e gestiti come sorgenti di energia, consentono una potenziale riduzione del numero di costosi impianti di generazione finalizzati al sopperimento dei picchi di richiesta energetica. L'immissione di potenza in rete da parte degli EV permette anche una più efficiente regolazione della tensione sulle reti di bassa tensione (come anche per le reti di media tensione) dei sistemi di distribuzione, ove la caduta di tensione è strettamente correlata al flusso di potenza.
La disponibilità di sistemi di accumulo distribuito connessi alla rete, favorisce inoltre la possibilità di connettere alla rete stessa un maggior numero di fonti stocastiche di energia, quali ad esempio gli impianti fotovoltaici ed i generatori eolici. Tuttavia, la convenienza dell'approccio V2G è soggetta alla valutazione del bilancio energetico complessivo del sistema, tenendo conto che l'operazione di immagazzinamento dell'energia e la successiva cessione della stessa non è un processo a rendimento unitario. Sull'efficienza complessiva della carica-scarica degli accumulatori, nelle diverse condizioni di funzionamento giocano in modo differente il rendimento del convertitore e il rendimento dell'accumulatore elettrochimico. In particolare, se per il convertitore le efficienze sono tipicamente massime in prossimità della piena potenza, negli accumulatori sono tipicamente preferibili profili a potenza ridotta per i vantaggi sia in termini di più elevata efficienza energetica sia in termini di un maggior numero di cicli vita, ovvero di un più lento decadimento della capacità di accumulo. Le attività di ricerca sono state finalizzate allo sviluppo di un modello energetico parametrizzato che consenta di determinare le perdite e i rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. Il lavoro svolto è principalmente focalizzato su applicazioni per mezzi di trasporto di tipo vetture per uso urbano e delivery van.

Universita di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale

L'Università di Padova per l'Obiettivo a - subtask a.1 ha svolto una ricerca dal titolo "Progetto e sperimentazione di un caricabatterie contactless per city car elettrica" . I sistemi che trasferiscono l'energia elettrica da una sorgente ad un utilizzatore senza che vi sia alcun contatto tra i due (sistemi contactless o wireless o plugless) risultano interessanti per molti impieghi industriali e civili grazie alla loro facilità e sicurezza d'uso. Infatti non richiedono l'inserimento di spine nelle prese né l'utilizzo di cavi di collegamento tra le presa e l'utilizzatore.

I sistemi contactless più convenienti per le applicazioni di potenza utilizzano l'accoppiamento induttivo tra due bobine, trasmittente (o primaria) e ricevente (o secondaria). Nel caso di un sistema contactless impiegato per la ricarica degli accumulatori di un veicolo elettrico, la bobina trasmittente è posta a terra mentre la bobina ricevente è posta a bordo del veicolo. I sistemi di accoppiamento induttivo con topologia risonante possiedono una maggiore efficienza nel trasferimento di energia ed inoltre sono in grado di trasferire alla bobina ricevente, anche se non allineata, una quota significativa dell'energia elettrica resa disponibile dalla sorgente, mantenendo una efficienza elevata.

La ricerca si riferisce allo sviluppo di un caricabatteria contactless risonante per la ricarica degli accumulatori (48 V, 100 A·h) di una city car elettrica che, quindi, costituisce il caso di studio considerato. Il lavoro svolto ha utilizzato come base di partenza i risultati ottenuti nella precedente annualità della Ricerca di sistema Elettrico che includevano il dimensionamento dei componenti/circuiti di potenza del caricabatteria. Come descritto in precedenza le attività nelle quali si è articolato il lavoro svolto sono state la rideterminazione del dimensionamento dei componenti di potenza del caricabatteria, la progettazione dei sottosistemi lo scompongono e la sua realizzazione prototipale con svolgimento di prove sperimentali per verificarne il corretto funzionamento.

Elenco documenti tecnici

Progetto A.3.2
Sistemi avanzati di accumulo di energia

- C. Arbizzani, L. Da Col, F. De Giorgio, M. Mastragostino, S. Monaco “Sintesi e caratterizzazione strutturale e morfologica di materiali catodici innovativi a base di manganese”, Università di Bologna - Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", RdS/PAR2013/177
- F. Rondino, V. Orsetti, A. Rufoloni, A. Santoni “Funzionalizzazione e morfologia di substrati di acciaio per la sintesi di anodi di silicio nanostrutturati per batterie litio-ione”, ENEA, RdS/PAR2013/178
- F. Maroni, A. Birrozzi, F. Nobili, R. Marassi “Materiali anodici avanzati per batterie al litio a base di leghe diverse”, Università di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie, RdS/PAR2013/179
- C. Arbizzani, L. Da Col, F. De Giorgio, M. Mastragostino, S. Monaco, M. Riché, “Caratterizzazione elettrochimica di celle litio-ione con materiali catodici innovativi a base di manganese”, Università di Bologna - Dipartimento di Chimica "Paolo Corradini", RdS/PAR2013/180
- P.P Prosini, “Progettazione di varie configurazioni di celle da laboratorio e caratterizzazione elettrochimica preliminare dei nuovi materiali elettrodici”, ENEA, RdS/PAR2013/181
- P.P Prosini, “Caratterizzazione completa chimica ed elettrochimica di celle complete da laboratorio con nuovi materiali elettrodici”, ENEA, RdS/PAR2013/182
- P. P. Prosini, C. Cento, M. Carewska, A. Masci “Sintesi e caratterizzazione strutturale e morfologica di materiali anodici e catodici”, ENEA, RdS/PAR2013/183
- P.P. Prosini C. Cento, M. Carewska, A. Masci “Progettazione delle celle di scala significativa di due tipologie diverse e completa caratterizzazione elettrochimica ed elettrica”, ENEA, RdS/PAR2013/184
- S. Calcaterra, F. Nobili, R. Marassi “Completamento e sviluppo dei modelli per celle a flusso Vanadio/Vanadio”, Università di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie, RdS/PAR2013/185
- A. Pozio, P.P. Prosini “Studi di base e realizzazione di prototipi di celle a flusso con materiali migliorati”, ENEA, RdS/PAR2013/186
- S. Calcaterra, R. Tossici, F. Nobili, R. Marassi “Studi di base sulla fattibilità di batterie a flusso a elevata capacità specifica basate sulla chimica delle batterie al litio”, Università di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie , RdS/PAR2013/187
- M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger “Identificazione del ciclo di potenza assorbita e dimensionamento di un sistema di accumulo per una tranvia”, Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell’Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2013/188
- M. Pasquali “Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione”, ENEA, RdS/PAR2013/189
- M. Pasquali, F. Vellucci “Analisi sperimentali per la “second life” di celle litio-ione”, ENEA, RdS/PAR2013/190
- F. D'Annibale, F. Vellucci “Analisi termografica su celle litio-ione sottoposte ad esperienze di "second life", ENEA, RdS/PAR2013/191
- C. Di Bari “Aspetti di sicurezza di sistemi di accumulo al litio ed ad alta temperatura per applicazioni nelle reti elettriche”, ENEA, RdS/PAR2013/192
- C. Di Bari, M. De Francesco “Procedura in sicurezza dell'apertura di celle al litio”, ENEA, RdS/PAR2013/193
- M.R. Mancini, S. Frangini “Sviluppo di processi di separazione dei materiali attivi di celle al litio tramite processi di solvatazione e sonicazione”, ENEA, RdS/PAR2013/194
- D. De Angelis “Caratterizzazione dei materiali da trattare e sulle opzioni tecnologiche attualmente esistenti per il loro recupero”, ENEA, RdS/PAR2013/195
- D. De Angelis “Rapporto preliminare sul processo individuato per il recupero di materiali da batterie agli ioni litio esauste tramite tecnologie idrometallurgiche ecosostenibili”, ENEA, RdS/PAR2013/196
- L. Cutaia, G. Barberio, R. Luciani, D. De Angelis “Valutazioni di ciclo di vita di batterie al litio”, ENEA, RdS/PAR2013/197
- D. De Angelis “Rapporto sugli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita”, ENEA, RdS/PAR2013/198
- M. Conte “Attività di comunicazione e partecipazione a gruppi di lavoro internazionali relativi ai sistemi di accumulo”, ENEA, RdS/PAR2013/199
- C. L. Bossi, E. Micolano, M. Conte “Documento congiunto di Coordinamento “Accumulo di energia elettrica”, ENEA, RdS/PAR2013/251

Progetto B.1.1
Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

- M. Migliori, G. Giordano "Catalizzatori per l'upgrading del syngas nei processi di gassificazione delle biomasse con acqua in condizioni supercritiche", Università della Calabria - Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica, RdS/PAR2013/125
- A. Molino, F. Nanna, V. Lauro, G. Santarcangelo, P. Iovane, D. Macrì, A. Villone "Produzione di biocombustibili attraverso processo integrato di gassificazione in acqua supercritica di biomasse umide", ENEA, RdS/PAR2013/130
- P. Di Profio, S. Arca, E. D'Alessandro "Sviluppo del processo di produzione di biometano da biogas mediante formazione di gas idrati", Università di Chieti e Pescara "G. d'Annunzio"- Dipartimento di Farmacia, RdS/PAR2013/133
- G. Chiatti, F. Palmieri, M. Amalfi "Analisi critica degli strumenti progettuali per scambiatori fumi-sali fusi operanti in differenti condizioni termofluido-dinamiche", Università di Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria, RdS/PAR2013/134
- A. Villone, D. Barisano "Upgrading della composizione di syngas digassificazione biomassa: selezione sorbenti per la cattura di CO2 e il simultaneo arricchimento in H_2", ENEA, RdS/PAR2013/138
- E. Macchi, D. Bonalumi "Proprietà chimico-fisiche del $TiCl_4$, aspetti normativi e autorizzativi, compatibilità dei materiali", Politecnico di Milano - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/151
- V. Palma, D. Barba "Studio dell'attività catalitica di catalizzatori a base di V2O5/CeO2 per l'ossidazione parziale selettiva di H_2S in biogas a basse temperature", Università di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/236
- V. Palma, D. Sannino, V. Vaiano "Studio sperimentale della reazione di ossidazione parziale selettiva di H_2S a zolfo a bassa temperatura mediante attivazione fotocatalitica", Università di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/237
- V. Palma, E. Meloni "Sviluppo di sistemi filtranti catalitici per l'abbattimento del particolato fine e l'ossidazione del CO", Università di Salerno - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/238
- G. Stoppiello con il contributo di M. Caldera, M. Gualtieri, F. Hugony, R. Roberto "Filtri catalitici di tipo wall flow per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida", ENEA, RdS/PAR2013/239
- S. Sau, N. Corsaro, A. Tizzoni, C. Felici "Nitrati fusi come fluido termovettore intermedio: caratterizzazione miscele ternarie e quaternarie", ENEA, RdS/PAR2013/240
- E. Ghisolfi "Sviluppo procedura di formatura pellets e caratterizzazione dei catalizzatori per la metanazione del syngas", FN SpA, RdS/PAR2013/241
- F. Barbato, M. De Mei, E. Cogliani, S. Ferrari, F. Petrazzuolo "Sistemi per la produzione di microalghe da inserire a valle del processo di digestione anaerobica", ENEA, RdS/PAR2013/242
- E. Ghisolfi "Caratterizzazione di supporti ceramici ed analisi IPA derivanti da prove sperimentali con caldaia a biomasse", FN SpA, RdS/PAR2013/243
- K. Gallucci, F. Micheli, P.U. Foscolo "Studio di sorbenti sperimentali per la cattura di CO2 da correnti gassose multicomponente", Università de L'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/PAR2013/244
- F. Micheli, K. Gallucci, P.U. Foscolo "Progettazione di un impianto scala laboratorio per la sperimentazione della cattura di CO_2 da corrente di processo in pressione", Università de L'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/PAR2013/245
- F. Basile, G. Fornasari, E. Lombardi, R. Mafessanti, A. Vaccari "Sviluppo e caratterizzazione di catalizzatore di metanazione Ni/Mg/Al e preparazione per la produzione di pellets", Università di Bologna -Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari", RdS/PAR2013/246
- F. Nanna, A. Villone, G. Canneto, D. Barisano, A. Molino "Test preliminari di produzione di biometano da syngas in reattore prototipale", ENEA, RdS/PAR2013/247
- G. Monteleone, M. Carewska, R. Ciccoli, M. De Francesco, S. Galli, P. Gislon, M . Granati, M. Graziadio "Abbattimento dell'H_2S e upgrading di un biogas proveniente da digestione anaerobica degli scarti di una mensa aziendale", ENEA, RdS/PAR2013/248
- E. Veca, M. Agostini, P. Tarquini "Prove di corrosione di vari acciai in miscele ternarie di nitrati fusi", ENEA, RdS/PAR2013/249
- M. Caldera, R. Roberto "Perfezionamento dello strumento di calcolo per l'analisi di sistemi energetici alimentati a biomassa legnosa", ENEA, RdS/PAR2013/250
- C. Patriarca, V. Mazzurco Miritana, S. Gorrasi, M. Fenice "Trattamento biologico di biomasse lignocellulosiche e chitinose per la produzione di idrogeno e/o metano", Università della Tuscia - Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche, RdS/PAR2013/252
- M. C. Annesini, R. Augelletti, P. De Filippis, M. Scarsella, N. Verdone " Sviluppo di un processo di separazione della CO_2 dal biogas mediante assorbimento con soluzioni amminiche in solvente organico", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/PAR2013/253
- A. Aliboni, N., Corsaro E. De Luca, C. Felici, F. Fiocchetti , G. Izzo, G. Lembo, L. Lona, G. Massini, V. Mazzurco Miritana, L. Mentuccia, C. Patriarca, S. Rosa, S. Sau, A. Signorini, G. Tuccini "Processi di digestione anaerobica di matrici non convenzionali e clean up biologico del biogas", ENEA, RdS/PAR2013/254

- E. Macchi, D. Bonalumi “Risultati sperimentali relativi alla stabilità termica del TiCl4, scelta dei materiali, approfondimento tecnico-economico”, Politecnico di Milano - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/269

Progetto B.1.3

Energia elettrica da fonte solare

Linea Progettuale 1. Ricerche su celle fotovoltaiche innovative

- P. Delli Veneri, L. V. Mercaldo, I. Usatii, E. Bobeico, M. Della Noce, L. Verdoliva “Sviluppo di strati assorbitori ad alta Eg a base di ossido di silicio per celle solari a film sottile di silicio”, ENEA, RdS/PAR2013/001
- A. Micco, G. Quero, A. Ricciardi, M. Pisco, A. Cusano, V. La Ferrara, L.V. Mercaldo, I. Usatii, 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 del Sannio -Dipartimento di Ingegneria /ENEA, RdS/PAR2013/002
- M.L. Addonizio, E. Gambale, L. Fusco, F. Cominale, A. Antonaia “Sviluppo di processi di testurizzazione di substrati di vetro mediante tecnica Aluminium Induced Texture”, ENEA, RdS/PAR2013/003
- A. Aronne, M. L. Addonizio, L. Minieri, P. Pernice “Sviluppo di processi di testurizzazione di substrati di vetro con metodi chimici”, Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale, RdS/PAR2013/004
- M. Della Noce, E. Bobeico, L. Lancellotti, M. Izzi, M. Tucci “Realizzazione di eterogiunzioni a contatto frontale su wafer di tipo p”, ENEA, RdS/PAR2013/005
- L. Serenelli, M. Tucci, M. Izzi, G. Stracci, P. Mangiapane, D. Caputo, G. de Cesare “Sviluppo di strati sottili di ossido trasparente e conduttivo e metallizzazioni per applicazione alle celle ad eterogiunzione silicio amorfo/silicio cristallino”, Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione, RdS/PAR2013/006
- M. Valentini, C. Malerba, C. Azanza, R. Chierchia, E. Salza, M. Capizzi, P. Scardi, A. Mittiga “Realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di Cu_2ZnSnS_4”, ENEA, RdS/PAR2013/007
- A. Polimeni, M. De Luca, M. Valentini, A. Mittiga, M. Capizzi “Misure di fotoluminescenza su campioni di CZTS”, Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Fisica, RdS/PAR2013/008
- C. Azanza, F. Girardi, R. D’Angelo, E. Cappelletto, C. Malerba, R. Di Maggio, A. Mittiga, P. Scardi “Crescita e caratterizzazione di film di CZTS a partire da soluzioni di sali o sospensioni di nanoparticelle”, Università di Trento - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, RdS/PAR2013/009
- C. De Rosa, C. Diletto, F. Auriemma, O. Ruiz de Ballesteros, R. Di Girolamo, P. Morvillo “Sviluppo di nanocompositi a base di copolimeri a blocchi per celle fotovoltaiche organiche”, Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche, RdS/PAR2013/010
- P. Morvillo, R. Ricciardi, R. Diana, C. De Rosa “Messa a punto di strati luminescenti per celle fotovoltaiche organiche”, Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche, RdS/PAR2013/011
- P. Delli Veneri, G. Graditi “Attività di diffusione dei risultati e collaborazioni internazionali”, ENEA, RdS/PAR2013/012

Linea Progettuale 2. Solare termodinamico

- G. Petroni, L. Rinaldi, C. Rocca, P. Tarquini “Progetto dell’impianto di cogenerazione con microturbina a vapore. Schema dei circuiti vapore e acqua e delle strumentazione. Progetto nuovo generatore di vapore”, ENEA, RdS/PAR2013/135
- A. Antonaia, A. Castaldo, S. Esposito, A. Guglielmo “Fabbricazione e caratterizzazione di strati sottili metallici e dielettrici per la realizzazione di filtri solari del tipo interferenziale”, ENEA, RdS/PAR2013/223
- A. Antonaia, A. Castaldo, S. Esposito, A. Guglielmo “Sperimentazione preliminare della tecnica MetaMode mediante l’utilizzo della sorgente IBAD”, ENEA, RdS/PAR2013/224
- A De Luca, T. Crescenzi “Accumulo di calore con materiale solido per impianti solari termodinamici alimentati a fluido gassoso”, ENEA, RdS/PAR2013/225
- A. Miliozzi, E. Veca “Selezione e caratterizzazione di una miscela di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle per lo sviluppo di un sistema di accumulo termico nell’intervallo di temperatura 200-250 °C”, ENEA, RdS/PAR2013/226
- M. Chieruzzi, J. M. Kenny “Studio, produzione e caratterizzazione di un nanoPCM, sia in forma massiva che micro incapsulata, con temperatura di fusione prossima a 220°C”, Università di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/PAR2013/227
- A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini “Simulazione del comportamento termo-dinamico di un elemento base di accumulo a calore latente e sua progettazione”, ENEA, RdS/PAR2013/228
- G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana “Tecniche di modellazione di moduli di accumulo contenenti micro capsule di PCM”, Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/PAR2013/229
- T. Crescenzi, A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, R. Liberatore, E. Giovannini, G. Napoli, D. Mele “Prove sperimentali del comportamento termico di un elemento base di accumulo”, ENEA, RdS/PAR2013/230
- G. Mazzucco, G. Xotta, V. Salomoni, C. Majorana “Progettazione campagna sperimentale su elementi in calcestruzzo ed analisi dei risultati”, Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, RdS/PAR2013/231

- F. Girardi, R. Di Maggio “Sviluppo di mescole per la produzione di calcestruzzo per accumulo termico. Produzione di elementi d’accumulo di calore e valutazione del comportamento dopo trattamento termico”, Università di Trento - Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica, RdS/PAR2013/232
- W. Gaggioli, L. Rinaldi, P. Tarquini “Prove sperimentali per la caratterizzazione termica di un serbatoio di accumulo a sali fusi nella fase di immagazzinamento dell’energia termica”, ENEA, RdS/PAR2013/233
- G. Chiatti, F. Palmieri, M. Amalfi “Studio e progettazione di un impianto di cogenerazione di piccola taglia con turbina a vapore alimentata da sistemi di accumulo a sali fusi di impianti solari a concentrazione - Progettazione e sviluppo di un impianto dimostrativo con microturbina”, Università di Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Elettrica, RdS/PAR2013/234
- M. Falchetta, G. Simbolotti “Supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali: rapporto sulle attività svolte”, ENEA, RdS/PAR2013/235

Progetto B.1.5
Studie valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

- A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino “Climatologia ad alta risoluzione spaziale dell’energia associata al moto ondoso nel Mediterraneo: mappe e indicatori di produttività”, ENEA, RdS/PAR2013/167
- M. Pollino, L. La Porta, E. Caiaffa “Progettazione e sviluppo delDSS5 WebGIS Waves Energy “, ENEA, RdS/PAR2013/168
- G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, A. Fontanella, E. Giovannini, G. Sannino “Metodologie per l’installazione di un convertitore ondoso full-scale”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale /ENEA, RdS/PAR2013/169
- G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino “Metodologia progettuale di un sistema di conversione inerziale di tipo passivo”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale / ENEA, RdS/PAR2013/170
- G. Mattiazzo, E. Giorelli, G.Bracco, E. Giovannini, A. Fontanella “Progettazione e costruzione del sistema meccanico di conversione in scala 1:45”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale / ENEA, RdS/PAR2013/171
- G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, E. Giovannini, A. Fontanella, A. Carillo, G. Sannino “Sintesi delle attività di sviluppo di un dispositivo inerziale passivo per la produzione di energia dal moto ondoso”, Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale / ENEA, RdS/PAR2013/172
- D. Nicolini, A. Fontanella, E. Giovannini “Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC - Fase 1: Messa a punto del modello CFD sulla base della geometria definitiva dell'apparato U-OWC sperimentale”, ENEA, RdS/PAR2013/173
- D. Nicolini, A. Fontanella, E. Giovannini “Analisi fluidodinamica CFD su dispositivi a colonna d'acqua oscillante OWC - Fase 2. Confronto tra risultati numerici e risultati sperimentali”, ENEA, RdS/PAR2013/174
- F. Arena, V. Fiamma, R. lannolo, G. Malara, A. Romolo, A. Fontanella, G. Sannino “Attività sperimentale di campo su modelli in scala ridotta di dispositivi a colonna oscillante del tipo U-OWC (U-Oscillating Water Column): risultati preliminari”, Università ‘Mediterranea’ di Reggio Calabria - Dipartimento Ingegneria Civile, Energia, Ambiente / ENEA, RdS/PAR2013/175
- F. Arena, V. Fiamma, R. lannolo, G. Malara, A. Romolo, A. Fontanella, E. Giovannini, G. Sannino “Progettazione, costruzione e installazione di un OWC a geometria modificabile in scala 1:8”, Università ‘Mediterranea’ di Reggio Calabria - Dipartimento Ingegneria Civile, Energia, Ambiente / ENEA, RdS/PAR2013/176

Progetto B.2
Cattura e sequestro della CO_2 prodotta da combustibili fossili

- T. Antonini, V. Anzoletti, G. Di Domenico, P.U. Foscolo, K. Gallucci” Validazione, mediante dati sperimentali, del modello per la descrizione del comportamento degli elementi a membrana perovskitica a trasporto ionico per l’apporto dell’ossigeno nell’ambiente di reazione (gassificazione vapore-ossigeno del carbone, reforming auto-termico del metano)”, Università dell’Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia , RdS/PAR2013/262
- Fiore, K. Gallucci, P.U. Foscolo “Caratterizzazione strutturale e morfologica di catalizzatori e sorbenti da utilizzare nella piattaforma pilota ZECOMIX della Casaccia” ,Università dell’Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia , RdS/PAR2013/264
- N. Jand, I. Aloisi, P. U. Foscolo “Comparazione numerica del comportamento cinetico di particelle di sorbente/catalizzatore diversamente strutturate - individuazione della distribuzione ottimale dei siti attivi catalitici e sorbenti, rispettivamente”, Università dell’Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia , RdS/PAR2013/266
- I. Aloisi, K. Gallucci, I. Fiore, P. U. Foscolo, G Vanga, S Scaccia, S Stendardo “Sintesi e caratterizzazione di materiali funzionali per la separazione della CO_2 ad alta temperatura”, Università dell’Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia / ENEA, RdS/PAR2013/292
- S. Stendardo, S. Scaccia, M. Nobili, L. Pagliari, S. Cassani, G. Messina, A. Assettati, G. Guidarelli, S. Attanasi, G. Vanga, P.U. Foscolo “Analisi sperimentale e modellazione di un gassificatore h_2o/o_2 alimentato a carbone per la produzione di syngas

ad alta qualità", ENEA / Università dell'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, RdS/PAR2013/260

- S. Scaccia, S. Stendardo, G. Vanga, L. Pagliari, S. Cassani, M. Nobili, G. Messina, A. Assettati, G. Guidarelli, S. Attanasi, C. Stringola, A. Grasso, I. Cassani, A. Calabró, P.U. Foscolo "Gassificazione del carbone in letto fluido di olivina alimentato da miscela H_2O/O_2: caratterizzazione del materiale granulare", ENEA / Università di L'Aquila - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2013/261
- S. Stendardo, P. U. Foscolo "Modellazione di processi gas-solido: gassificazione del carbone e separazione della CO_2 attraverso sorbenti solidi", ENEA / Università di L'Aquila - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2013/265
- M. Nobili, A. Assettati, G. Messina, L. Pagliari "Installazione della turbina Turbec t100 presso la piattaforma ZECOMIX", ENEA, RdS/PAR2013/267
- S. Scaccia, S. Stendardo, G. Vanga, L. Pagliari, S. Cassani, M. Nobili, G. Messina, A. Assettati,G. Guidarelli, S. Attanasi, C. Stringola, A. Grasso, I. Cassani, A. Calabró, P.U. Foscolo "Separazione della CO_2 attraverso sorbenti solidi ad alta temperatura: attività propedeutica al test SE-WGS: water gas shift e contemporanea cattura della CO_2", ENEA /Università di L'Aquila - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2013/268
- S. Cassani, M. Nobili, L. Pagliari, S. Scaccia, G. Vanga, S. Stendardo "Caratterizzazione impianto VAL.CH.I.RI.A (valorizzazione char impianto ricerche avanzate). Prime prove di pirolisi", ENEA, RdS PAR2013/296
- D. Cecere, E. Giacomazzi, F.P. Picchia, N. Arcidiacono "Simulazione diretta di una fiamma premiscelata metano/idrogeno/ aria", ENEA, RdS/PAR2013/270
- D. Cecere, E. Giacomazzi, F.P. Picchia, N. Arcidiacono "Sviluppo di un modello les per fiamme turbolente premiscelate", ENEA, RdS/PAR2013/255
- D. Cecere, E. Giacomazzi, F.P. Picchia, N.Arcidiacono "Large eddy simulatione (les) di un bruciatore swirlato metano/aria", ENEA, RdS/PAR2013/271
- G. Rossi, B. Favini "Sviluppo di un solutore "multizona" a diversa risoluzione spaziale", Università di Roma "Sapienza" – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, RdS/PAR2013/293
- E. Giacomazzi, F.R. Picchia, G. Messina, D.Cecere, N.Arcidiacono, G. Rossi, B. Favini "Sviluppo di una nuova strategia per il calcolo delle proprieta' di una miscela ad alta pressione", ENEA - Università di Roma "Sapienza" - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, RdS PAR2013 256
- A. Di Nardo, G. Calchetti "Studio numerico del bruciatore ETVB-MOD1 in regime di ossi-combustione", ENEA, RdS/PAR2013/259
- Di Nardo, G. Calchetti, M. Rufoloni "Simulazioni CFD di un combustore convenzionale per turbogas, in regime di ossicombustione", ENEA, RdS/PAR2013/286
- S. Chiocchini, E. Giacomazzi, E. Giulietti, A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Stringola "Strategie per l'aumento della load flexibility in bruciatori per turbo-gas", ENEA - Università di Roma TRE – Dipartimento di ingegneria, RdS/PAR2013/257
- R. Camussi, T. Pagliaroli, E. Giulietti, C. Stringola "Caratterizzazione sperimentale di un bruciatore Trapped Vortex", Università di Roma TRE – ENEA, RdS/PAR2013/258
- G. Messina, C. Stringola, G. Guidarelli, A. Assettati, A. Grasso "Simulazione del funzionamento della micro-turbina turbec t100 con fluidi di lavoro diversi dall'aria", ENEA, RdS/PAR2013/297
- V. Barbarossa, G.Vanga "Metanazione", ENEA, RdS/PAR2013/290
- A. Pettinau, G. Calì, M. Fadda, F. Ferrara, C. Frau, E. Loria, A. Orsini, P. Miraglia, F.Tedde "Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione di carbone e biomasse presso la piattaforma pilota SOTACARBO", SOTACARBO, RdS/PAR2013/273
- D. Pinna, M. Errico, R. Baratti "Attività di modellistica dei sistemi CCS - analisi dinamica e controllo di impianti di cattura postcombustione della CO_2 al variare delle condizioni di esercizio", Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica Chimica e dei Materiali, RdS/PAR2013/274
- G. Cau, D.Cocco, V. Tola "Analisi dell'integrazione di impianti a vapore ultra supercritici (USC) e sistemi solari a concentrazione", Università di Cagliari -Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali, RdS/PAR2013/275
- G. Calì, C. Frau, P. Miraglia, D. Multineddu "Test di separazione della CO_2 da syngas presso impianto pilota", SOTACARBO, RdS/PAR2013/276
- G. Calì, F. Tedde, P. Miraglia, E.Maggio, C. Raffaele, A. Madeddu, M. Fadda, A. Orsini, C. Frau, E. Loria, P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano "Progetto e realizzazione delle modifiche dell'impianto dimostrativo per la cogassificazione di carbone e biomasse", SOTACARBO / ENEA, RdS/PAR2013/277
- G. Calì, F. Tedde, P. Miraglia, D. Multineddu, A. Orsini, P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano "Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione di carbone e biomasse presso la piattaforma pilota SOTACARBO", SOTACARBO / ENEA, RdS/PAR2013/278
- C. Frau "Caratterizzazione del "coal slurry", definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo", SOTACARBO, RdS/PAR2013/279
- M.C. Tilocca "Sviluppo nei processi di preparazione delle miscele coal water", Università di Cagliari, RdS/PAR2013/280
- C. Frau, E. Loria "Progetto di una sezione di recupero di H_2SO_4", SOTACARBO, RdS/PAR2013/281
- A. Plaisant, D. Multineddu, R. Cara "Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo geostrutturale", SOTACARBO, RdS/PAR2013/282

- A. Plaisant, D. Multineddu, R. Cara "Procedure autorizzative, analisi della normativa e richiesta concessioni per attività di ricerca e prospezione finalizzate alla caratterizzazione di potenziali siti per lo storage geologico della CO_2", SOTACARBO, RdS/PAR2013/283
- A. Plaisant, D. Multineddu, R. Cara "Analisi geofisiche e caratterizzazione baseline dell'area del bacino del SULCIS", SOTACARBO, RdS/PAR2013/284
- G. Serra, A- Madeddu "Resoconto delle attivita' di divulgazione e diffusione", SOTACARBO, RdS/PAR2013/285
- P. Deiana, M. Subrizi, C. Bassano "Tecnologie avanzate di gassificazione", ENEA, RdS PAR2013 294
- P. Deiana, C. Bassano, B. de Caprariis, P. De Filippis, M. Scarsella, N. Verdone, M.G. Cutrufello, I. Ferino, R. Monaci, E. Rombi "Analisi di sistema e sperimentazione relativa alla produzione SNG da CO E CO_2", Università di Roma "Sapienza" - Dipartimento Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente / Università di Cagliari - Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, /ENEA, RdS/PAR2013/263
- C. Bassano, P. Deiana, G. Ferraro, N. Verdone, M. Martinelli, C.G. Visconti, L. Lietti, P. Forzatti "Tecnologie coal and biomass to liquid: analisi energetiche di processo e indagini sperimentali per lo sviluppo di nuovi catalizzatori della sintesi Fischer-Tropsch", ENEA, RdS/PAR2013/288
- S. Scaglione, D. Zola "Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di combustione in regime mild", ENEA, RdS/PAR2013/300
- E. Giulietti, C. Stringola "Studio di sistemi diagnostici per il monitoraggio della combustione mild di carbone in ossigeno", ENEA, RdS/PAR2013/272
- V. Barbarossa, G. Vanga "Ossidazione di SO_2 ad H_2SO_4", ENEA, RdS/PAR2013/289
- Giuseppe Messina, Eugenio Giacomazzi "Modellazione di un ciclo di potenza a CO_2 supercritica da 48 MWT Alimentato dal loop isotherm PWR®", ENEA, RdS/PAR2013/298
- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizi, S. Bigi, S.Lombardi, S. Graziani, L. Ruggiero, M.C. Tartarello, P. Sacco, D. De Angelis "Sperimentazione di una rete fissa e mobile di monitoraggio geochimico nell'area del bacino del Sulcis", ENEA / Universita di Roma "Sapienza"- CERI, RdS/PAR2013/287
- P. Deiana, C. Bassano, A. Corleto, V. Tomassetti **"**Comunicazione e diffusione dei risultati: 2nd CCS Sulcis Summer School**",** ENEA, RdS/PAR2013/295

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

- S. Lo Meo "Cross section calculations for fission reactions induced by intermediate energy (100 MeV – 1 Gev) nucleons and Monte Carlo simulation of neutron flux at the n_TOF facility (CERN)", ENEA, RdS/PAR2013/076
- M. Pescarini, R.Osi, M. Frisoni "Validation of the BUGJEFF311.BOLIB, BUGENDF70.BOLIB and BUGLE-96 cross section libraries on the PCA-Replica (Water/Iron) neutron shielding benchmark experiment", ENEA, RdS/PAR2013/077
- M. Frisoni "Updating of the libraries Included in the ANITA-2000 code package on the basis of the JEFF-3.1.1 radioactive decay library", ENEA, RdS/PAR2013/078
- K.W. Burn, P. Console Camprini "Use of Monte Carlo to evaluate radiation damage to corium detector in pwr severe accident scenario", ENEA, RdS/PAR2013/079
- R. Pergreffi, F.Rocchi "Sezioni d'urto a due gruppi del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 1600 MWe finalizzate a calcoli di safety di nocciolo", ENEA, RdS/PAR2013/080
- G. Bandini, R. Calabrese, S. Ederli "Development and verification of calculation models for the accident analysis in nuclear power plants", ENEA, RdS/PAR2013/081
- G. Bandini, M. Di Giuli, M. Sumini, A. Manfredini, W. Ambrosini "Lessons learned from the result comparison of calculations of a reference severe accident sequence on a TMI-2 Like PWR reactor of 900 MWe with the integral codes ASTEC and MELCOR", ENEA /CIRTEN, RdS/PAR2013/082
- F. Padoani, G. Glinatsis, C. Petrovich, F. Rocchi, A. Guglielmelli, F. Rossi "Resistenza alla proliferazione, nuclear security e sostenibilità del ciclo del combustibile", ENEA, RdS/PAR2013/083
- A. Luce, A. Rizzo, G. Glinatsis, R. Lo Frano "Contributo alla Piattaforma IGD-TP e altre Iniziative internazionali sulla gestione dei rifiuti radioattivi", ENEA, RdS/PAR2013/084
- F. Rocchi, A. Guglielmelli, M. Sumini "raccolta di coefficienti e parametri integrali per il calcolo rapido di termini sorgente a partire da inventari di nocciolo per PWR e BWR", CIRTEN, RdS/PAR2013/085
- C. Lombardo, F. Mascari, P. Buffa, F. Castiglia, M. Giardina, G. Palermo "Nodalizzazione MELCOR per lo studio integrale di sequenze incidentali su reattori PWR da 900 MWe e valutazioni preliminari d'impatto a breve e medio raggio", CIRTEN / ENEA, RdS/PAR2013/086
- E. Negrenti, C. Parisi, F. Giannetti, G. Caruso "Feasibility analysis and uncertainty quantification for a "Fast Running" chain of codes for the NSS accident management", ENEA /CIRTEN, RdS/PAR2013/087
- F. Bertozzi "Realizzazione di un data base esperto a supporto della gestione di una situazione di crisi - Fase 2", ENEA,

RdS/PAR2013/088

- L. Burgazzi, N. Davidovich, P. Meloni, R. Lo Frano "Risk analysis of nuclear power plants against external events scenario", ENEA, RdS/PAR2013/089
- C. Parisi, F. Mascari, P. Balestra, F. Giannetti, G. Caruso "Fukushima Dai-ichi Unit 1 accident simulation by best estimate and integral Codes & Accident Management Procedures identification focusing on BWR close to the Italian borders", CIRTEN /ENEA, RdS/PAR2013/090
- M. Rigamonti, C. Congiu "Analisi di fattibilità e costi di una nuova configurazione della Facility SPES3", SIET, RdS/PAR2013/091
- O. De Pace, A. Achilli, S. Botti, G. Cattadori "Feasibility study on the experimentation of a decay heat removal system (DHRS) for Lead Fast Reactors (LFR)", SIET, RdS/PAR2013/092
- C. Lombardo, M. Polidori, P. Chiovaro, S. D'Amico, I. Moscato, G. Vella "Validazione e Verifica (V&V) di CATHARE2 e TRACE sul Programma sperimentale SPES2", CIRTEN /ENEA, RdS/PAR2013/093
- C. Randaccio "Analisi dei dati sperimentali disponibili dello Spool Piece per stimare e ridurre l'incertezza sulla misura della portata di fluido bi-fase", SIET, RdS/PAR2013/094
- M. Caramello, M. De Salve, G. Monni, B. Panella "Modellazione di uno Spool Piece per la stima dei parametri caratteristici dei deflussi bifase", CIRTEN, RdS/PAR2013/095
- M. Caramello, M. De Salve, B. panella, G. Maronati, M.E. Ricotti "Compact heat exchangers/steam generators and decay heat removal in passive safety systems: comparison of thermal hydraulic", CIRTEN, RdS/PAR2013/096
- F. de Rosa "Diffusione dell'informazione sulle attività svolte in ambito B.3.1-LP1: "Sviluppo di Competenze Scientifiche nel Campo della Sicurezza Nucleare", ENEA, RdS/PAR2013/097

Linea Progettuale 2. Collaborazione internazionale per il nucleare di IV generazione

- A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli, L. Ferroni, Giannetti, D. Vitale di Maio, V. Covicchio "Studi di sostenibilità volti a massimizzare l'utilizzo del combustibile e a minimizzare le scorie nucleari con i sistemi veloci refrigerati a piombo", CIRTEN, RdS/PAR2013/013
- J.L. Manzano, M. Ciotti "Studi e Valutazioni del costo del DEMO LFR ALFRED", ENEA, RdS/PAR2013/014
- N. Burgio, A. Santagata, M. Frullini "Progettazione di una facility per misure di trasporto neutronico nel reattore TAPIRO", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/015
- A. Gandini, L. Ricci, N. Burgio "Valutazione della rappresentatività di esperimenti di trasporto neutronico in Piombo in una facility collocata nel vano colonna termica del reattore TAPIRO", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/016
- A. Gandini, L. Cretara, V. Peluso, A. Naviglio "Implementation of the GPT methodology in the non-linear neutron/nuclide field in the ERANOS code", CIRTEN, RdS/PAR2013/017
- G. Grasso, C. Petrovich, D. Mattioli, F. Lodi, M. Sumini "Ottimizzazione del progetto di nocciolo di ALFRED", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/018
- G. Grasso, D. Mattioli, C. Petrovich, A. Guglielmelli, F. Lodi, M. Sumini, R. Lo Frano "Studi preliminari di tecniche di monitoraggio del nocciolo di ALFRED", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/019
- L. Lepore, R. Remetti, M. Cappelli "Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR. Concettualizzazione di test sperimentali preliminari sul reattore TAPIRO", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/020
- E. Negrenti, B .Fresilli, G .Di Costanzo, M. D'Apice, C. Innarella, C. Parisi, M. Serra, A. Tripi, C. Galli ", Rapporto sulla architettura dettagliata ed i componenti di una piattaforma di simulazione ingegneristica per reattori refrigerati al piombo, e l'utilizzo di specifici moduli software", ENEA, RdS/PAR2013/021
- L. Luzzi, S. Lorenzi, D. Pizzofri, D. Rozzia, A. Aly, A. Del Nevo "Modeling and analysis of nuclear fuel pin behavior for innovative lead cooled FBR", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/022
- A. Del Nevo, I. Di Piazza, C. Parisi, P. Console Camprini, E. Martelli, P. Balestra, A. Naviglio "Development and validation of an approach and numerical models for safety analysis of FBR", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/023
- R. Lo Frano, G. Forasassi, G. Pugliese, A. Sanfiorenzo "Assesment of the structural-dynamic effects caused by the core compaction", CIRTEN, RdS/PAR2013/024
- I. Di Piazza, P. Console Camprini "Numerical analysis of flow blockage phenomena in the ALFRED FA: preliminary study on neutronic feedback", ENEA, RdS/PAR2013/025
- G. De Angelis, M. Capone, C. Fedeli, G.A. Marzo E. Macerata, E. Mossini, M. Cerini, M. Negrin, A. Tosolin, M. Mariani, M. Gioia "Studio delle Interazioni fra combustibile e Refrigerante in Sistemi LFR", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/026
- A. Bellucci "Sb.1viluppo di ricoperture CVD a base Al-Fe per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo", CIRTEN, RdS/PAR2013/027
- F. Nanni, F.R. Lamastra, G. Forasassi, M. Bragaglia "Studio del comportamento di rivestimenti sottoposti a ciclaggio termico", CIRTEN, RdS/PAR2013/028
- M.G. Beghi, E. Besozzi, M. Ricotti, F. Garcia Ferré, F. Di Fonzo "Sviluppo di Ricoperture per la protezione di materiali strutturali operanti in sistemi nucleari refrigerati a piombo mediante tecniche di ablazione laser", CIRTEN, RdS/PAR2013/029
- A. Bellucci, S. Bellini "Report sulla caratterizzazione di materiali strutturali ricoperti per applicazioni nucleari: definizione dei

criteri di fallimento dei rivestimenti per deplezione dell'elemento passivante", CIRTEN, RdS/PAR2013/030

- F. Nanni, F.R. Lamastra, G. Forasassi, M. Bragaglia "Report sulla caratterizzazione delle proprietà meccaniche di ricoperture per applicazioni nucleari", CIRTEN, RdS/PAR2013/031
- M.G. Bechi, F. Garcia Ferré, F. Di Fonzo, M.E. Angiolini "Report sulla caratterizzazione di rivestimenti mediante prove di irraggiamento con ioni pesanti", CIRTEN, RdS/PAR2013/032
- S. Giusepponi, M. Celino, M. E. Angiolini "Modellazione dei fenomeni di corrosione/dissoluzione da metallo liquido pesante", ENEA, RdS/PAR2013/033
- A. Coglitore, G. Raiteri, M. Scafè, A. Strafella "Prove di CREEP-RUPTURE su materiali strutturali ricoperti per applicazioni in sistemi refrigerati a metallo liquido pesante", ENEA, RdS/PAR2013/034
- C. Cristalli "Double Stabilized Stainless Steel Procurement", ENEA, RdS/PAR2013/035
- E. Ghisolfi "Rapporto tecnico relativo a studi di fattibilità e prove di fabbricazione elementi prototipali per griglie spaziatrici del fuel assembly DEMO ALFRED", FN SpA, RdS/PAR2013/036
- S. Bassini, A. Gessi, A. Antonelli "Prove di Corrosione su Materiali Strutturali Ricoperti in Piombo Stagnante", ENEA, RdS/PAR2013/037
- S. Bassini, A. Gessi, A. Antonelli "Concettualizzazione di un impianto per il monitoraggio del rateo di corrosione su materiali strutturali operanti in piombo fluente", ENEA, RdS/PAR2013/038
- M. Tarantino "Specifica Tecnica per upgrade impianto LECOR per prove di corrosione in piombo fluente", ENEA, RdS/PAR2013/039
- A. Del Nevo, M. Tarantino, D. Rozzia, N. Forgione, L Scaletti "ALFRED-SGBT. Preliminary characterization by the HERO test section", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/040
- M. Cappelli, F. Cordella, A. Lucchi, G. Tiranti "Studio di fattibilità teorico-sperimentale sull'analisi TDR per la misura di livello di un sistema bifase", ENEA, RdS/PAR2013/041
- Pesetti, P. Gaggini, M. Tarantino "Fornitura Coperchio S100 Impianto CIRCE per prove a pressione elevata", ENEA, RdS/PAR2013/042
- F. Moretti, M. Lanfredini, L Mengali, F. D'Auria "Report sull'accoppiamento di codici CFD e codici di sistema", CIRTEN, RdS/PAR2013/043
- D. Martelli, N. Forgione, G. Barone, W. Ambrosini "Validation of the coupled calculation between RELAP5 STH code and Ansys FLUENT CFD code", CIRTEN, RdS/PAR2013/044
- Cervone, D. Cerroni, R. Da Via, F. Menghini, S. Manservisi, G. Pozzetti "Integration of the FEM-LCORE code in the SALOME platform", CIRTEN, RdS/PAR2013/045
- M. Polidori "Progressi nella validazione del codice T/H CATHARE2 attraverso il benchmark LACANES", ENEA, RdS/PAR2013/046
- R. Bonifetto, D. Caroti, S. Dulia, L Savoldi Richard, P. Ravetto, R. Zanino, A. Del Nevo "Development of the neutronic module and benchmark and validation of the thermal-hydraulic module of the FRENETIC code", ENEA / CIRTEN, RdS/PAR2013/047
- M.Tarantino, P. Gaggini "Specifica tecnica di fornitura e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA", ENEA, RdS/PAR2013/048
- Di Piazza "Specifica tecnica di fornitura e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE", ENEA, RdS/PAR2013/049
- I. Di Piazza "Specifica tecnica di fornitura e installazione della facility SOLIDX", ENEA, RdS/PAR2013/050
- M.Tarantino "Raccolta delle Lecture del Workshop Tematico "LFR-Gen IV: Stato attuale della tecnologia e prospettive di sviluppo", ENEA, RdS/PAR2013/051

Progetto B.3.2
Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER

- A. Cucchiaro, G. M. Polli "Progress in the manufacturing activities for the supply of 9 TF Coils of JT-60SA Tokamak", ENEA, RdS/PAR2013/200
- P. Rossi, A. Cucchiaro "Realizzazione dei componenti ricavati da laminati per la composizione di quindici casse di contenimento e di due gomiti in materiale forgiato", ENEA, RdS/PAR2013/201
- P. Rossi, A. Cucchiaro "Rapporto tecnico per la valutazione dei risultati delle prove eseguite sui materiali, Fase A", ENEA, RdS/PAR2013/202
- A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace, P. Zito "Prove sul prototipo finale di Switching Network Unit per l'esperimento internazionale JT-60SA", ENEA, RdS/PAR2013/203
- A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace, P. Zito "Realizzazione di 3 sistemi statici per l'interruzione di correnti continue fino a 20 Ka", ENEA, RdS/PAR2013/204
- P. Zito, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace "Disegni di fabbrica e layout definitivi dei sistemi di alimentazione elettrica delle bobine del Tokamak JT-60SA", ENEA, RdS/PAR2013/205
- P. Zito, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace "Realizzazione e collaudo dei trasformatori speciali per gli alimentatori del

controllo veloce della posizione del plasma (FPPC) di JT-60SA", ENEA, RdS/PAR206

- A. Aiello, G. Micciché, A. Tincani "Risultati della campagna sperimentale sull'impianto ELTL di Oarai per la rilevazione dei fenomeni di cavitazione", ENEA, RdS/PAR2013/207
- P. Favuzza, G. Fasano, S. Mannori, M. Tarantino, A. Tincani "Rapporto finale sulla realizzazione e commissioning dell'impianto LiFus6 per lo studio dei fenomeni di erosione/ corrosione da litio", ENEA, RdS/PAR2013/208
- P. Favuzza, A. Antonelli, R. Traversi, M. Severi "Validazione sperimentale della procedure di analisi offline della purezza del litio e stima della cinetica di purificazione", ENEA, RdS/PAR2013/209
- G. Miccichè, F. Frascati, L. Lorenzelli "Risultati delle prove di manutenzione remotizzata per il ricondizionamento e per la sostituzione del Target assembly di IFMIF", ENEA, RdS/PAR2013/210
- G. Miccichè, F. Frascati, L. Lorenzelli con il contributo di G. Di Gironimo, R. Mozzillo (Consorzio Create) "Simulazione grafica del processo di manutenzione remotizzata del TA di IFMIF", ENEA, RdS/PAR2013/211
- D. Bernardi, M. Frisoni, G. Miccichè, M. Serra con il contributo di P.A. Di Maio, P. Arena, G. Bongiovì (Università di Palermo) "Progettazione dei sistemi ausiliari del target assembly di IFMIF", ENEA, RdS/PAR2013/212
- L. Pilloni, C. Cristalli "Analisi preliminare dei materiali alternativi per la realizzazione del target assembly di IFMIF", ENEA, RdS/PAR2013/213
- D. Bernardi, P.C. Camprini, M. Granieri (ENEA) con il contributo di R. Lo Frano, G. Pugliese (Università di Pisa) "Studio preliminare di sorgenti neutroniche alternative da 14 MeV", ENEA, RdS/PAR2013/214
- E. Ferrari "Rapporto tecnico riferito alla realizzazione e caratterizzazione di materiali in SiCf/SiC da utilizzare come componenti funzionali e strutturali", FN SpA, RdS/PAR2013/215
- S. Tosti, A. Moriani, L. Verdini "Rapporto sul collaudo finale del forno ad alta temperatura", ENEA, RdS/PAR2013/218
- F. Crisanti, G. Calabro, G. Ramogida , Di Gironimo, R. Albanese, R. Ambrosino "Studio del power exhaust e d ell'interazione tra centro e bordo del plasma in EAST e FAST", ENEA /Consorzio CREATE, RdS/PAR2013/219
- F. Crisanti, G. Calabro, G. Ramogida, G. Di Gironimo, R. Albanese, R. Ambrosino "Sviluppo della configurazione di plasma di tipo "Snow-Flake" fast-LIKE per EAST", ENEA /Consorzio CREATE, RdS/PAR2013/220
- F. Crisanti, G. Calabro, G. Ramogida, G. Di Gironimo, F. Renno, C. Labate "Studio della sostituzione da remoto del divertore e della prima parete in FAST e EAST", ENEA/Consorzio CREATE, RdS/PAR2013/221
- F. Crisanti, G. Calabro, G. Ramogida, G. Di Gironimo, D. Marzullo "Progettazione preliminare di un divertore per FAST ed EAST compatibile con configurazioni di plasma di tipo "Snow-Flake", ENEA/ Consorzio CREATE, RdS/PAR2013/221

Progetto C.1
Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

- B. Di Pietra, G. Puglisi, L.Pazzola, F.. Zanghirella "Metodologie di valutazione avanzata delle prestazioni di reti energetiche termiche", ENEA, RdS/PAR2013/052
- F. Melino, M. A. Ancona "Analisi di soluzioni tecniche e gestionali che favoriscano l'implementazione di nuovi servizi energetici nelle reti termiche in presenza di sistemi di generazione distribuita", Università di Bologna - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/053
- B. Di Pietra, A. Pannicelli G. Puglisi, F. Zanghirella "Sviluppo di modelli per l'analisi energetica del servizio di scambio sul posto termico applicato alle reti di teleriscaldamento in presenza di impianti solari distribuiti", ENEA, RdS/PAR2013/054
- F. Bonfà, F. Zanghirella "Sviluppo di una metodologia per l'individuazione del potenziale di applicazione e sviluppo delle reti termiche efficienti su scala nazionale e locale", ENEA, RdS/PAR2013/055
- M, Badami, A. Portoraro "Analisi di performance e monitoraggi energetici di reti termiche distribuite", Politecnico di Torino - Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, RdS/PAR2013/056
- C. Landi, D. Gallo, M. Luiso " Sviluppo di metodologie e strumenti di analisi delle prestazioni di reti di smart meter", Seconda Università di Napoli - Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, RdS/PAR2013/058
- M. Manganelli, M. C. Falvo, L.Martirano "Analisi dei profili di carico di utenze elettrotermiche ed implementazione di nuove soluzioni gestionali che favoriscano la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2013/059
- M. Annunziato, C. Meloni, F. Pieroni, S. Pizzuti, F. Romanello, S. Romano, M. Chinnici, A. Quintiliani, P. Clerici Maestosi "Gestione integrata di una rete di edifici in uno Smart Village: sperimentazione di diagnostica avanzata per la climatizzazione, implementazione e test di algoritmi di ottimizzazione orientati alla domanda attiva per il caso termico invernale ed implementazione di strumenti di visualizzazione grafica integrata", ENEA, RdS/PAR2013/060
- A. Capozzoli , S. P. Corgnati, I. Khan , F. Lauro, D. Raimondo "Validazione, analisi e modelli di diagnostica energetica avanzata di reti di edifici " Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/061
- F. Lauro, F. Moretti, S. Panzieri "Sviluppo di un sistema di supervisione e controllo BEMS e diagnostica di anomalie su impianti di climatizzazione attraverso algoritmi di data fusion", Università di Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria, RdS/PAR2013/062
- G. Comodi, A. Fonti, A. Giantomassi, F. Polonara, S. Longhi "Sviluppo di un simulatore di edifici orientato alla gestione attiva

della domanda", Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/PAR2013/063

- P. Manini, V. Criscuolo, L. Leone, M.G. Aufiero "I triazatruxeni quali nuovi materiali organici per applicazioni in dispositivi OLED: sintesi, caratterizzazione e relazione struttura- proprietà", Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche e Farmaceutiche, RdS/PAR2013/064
- M. Rossi, F. Musante, D. Casciani "Lighting design nell'industria", Politecnico di Milano - Dipartimento di Design, RdS/PAR2013/065
- A .Rizzi, C. Bonanomi "Analisi dell'influenza dei fattori contestuali sulla resa cromatica delle sorgenti di luce", Università di Milano - Dipartimento di Informatica, RdS/PAR2013/066
- C. Burattini, F. Ferlazzo, L. Piccardi, A. M. Giannini, F. Bisegna "Analisi delle caratteristiche luminose di nuove sorgenti di illuminazione artificiale e valutazione dei loro effetti sulla vigilanza ed attenzione", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2013/067
- N. Gozo, M. Annunziato, S. Fumagalli, G. Giuliani, C. Honorati Consonni, F. Marino, M.G. Villani "Osservatorio per la Pubblica Illuminazione e modello di Management per gli impianti e il servizio", ENEA, RdS/PAR2013/068
- R. Chierici, A. Di Gregorio, N. Gozo "City Profiler – Software per il supporto all'efficientamento energetico e il monitoraggio degli impianti illuminotecnici", Università di Milano Bicocca - Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio (CRIET) / ENEA, RdS/PAR2013/069
- M. Esitini, M. Merrone, N. Gozo "Schede Censimento – Uno strumento per incentivare i processi d'efficientamento energetico della rete di pubblica illuminazione", ASSISTAL / ENEA, RdS/PAR2013/070
- A. Antonelli, L. Blaso, S. Fumagalli, G. Leonardi, O. Li Rosi, P. Pistochini, E. Rusconi, M.G.Villani, P. Zangheri "Attività sperimentale per sviluppo dei sistemi di illuminazione efficienti e studi relativi alla resa cromatica delle sorgenti luminose, eventi formativi, GIS per illuminazione pubblica", ENEA, RdS/PAR2013/071
- L. Quercia, D.P alumbo, P. Di Lorenzo, A. Tatì, F. Lazzaroni, S. Chiavarini, T. Beltran "Caratterizzazione, mediante naso elettronico commerciale, dell'atmosfera interna della cella frigorifera caricata con ortofrutta fresca al fine dello sviluppo di un naso elettronico innovativo finalizzato al risparmio energetico", ENEA, RdS/PAR2013/072
- M.V. Russo, I. Fratoddi, I. "Materiali nanostrutturati innovativi a base polimerica, nanoparticelle metalliche e loro compositi come assorbitori di etilene rilevabile da variazioni di proprietà elettroniche", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Chimica, RdS/PAR2013/073
- A. Tatì, M. Mongelli, L. Quercia A. Colucci, F. Di Biagio "Ottimizzazione e caratterizzazione di pannelli sandwich contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere per il trasporto ferroviario", ENEA, RdS/PAR2013/074
- P. Principi, R. Fioretti, B. Copertaro "Sviluppo di strutture multistrato contenenti materiali a cambiamento di fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere per trasporto su vagoni ferroviari", Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, RdS/PAR2013/075
- G. B. Sgritta, E. Agolini, F. Mignella Calvosa, F. Deriu, P. Ginefra, C. Lopedote, G. Vetritto, N. Zamaro "SMART CITIES vs SOCIETING : k-words per lo sviluppo di queries utili alla classificazione di progetti in chiave Smart Cities", Consiglio Italiano per le Scienze Sociali (CSS), RdS/PAR2013/154
- I. Bertini "Attività di comunicazione e diffusione del progetto C1-Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi", ENEA, RdS/PAR2013/155
- M. G. Maglione, P. Tassini, C. Minarini "Dispositivi luminescenti organici (OLED) realizzati impiegando materiali di nuova sintesi, i triazatruxeni", ENEA, RdS/PAR2013/217
- A. Del Giudice, G. Graditi, M. Valenti "Analisi dei protocolli di comunicazione e sincronizzazione per smart meter", ENEA, RdS/PAR2913/057

Progetto C.2
Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

- S. Ferrari "Analisi critica dei dati sui consumi elettrici del terziario: gli edifici del Politecnico di Milano", Politecnico di Milano - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, RdS/PAR2013/105
- G. Murano, G. Riva "Individuazione delle innovazioni ai fini del contenimento dei consumi elettrici e in generale dei consumi energetici degli edifici e dei costi dei nZEBda parte della pubblica amministrazione", Comitato Termotecnico Italiano (CTI), RdS/PAR2013/106
- V. Corrado, I. Ballarini, I. Ottati, S. Paduos "Aggiornamento della metodologia cost optimal secondo Direttiva 2010/31/UE", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/107
- S. Corgnati, V. Fabi "Analisi dell'influenza del comportamento dell'utenza sui consumi energetici finali degli edifici: fattori influenzanti, modelli probabilistici per la simulazione degli occupanti e profili comportamentali tipo (IEA-EBC Annex 66)", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/108
- M. Perino "Materiali e sistemi innovativi per l'involucro edilizio opaco: abaco di soluzioni, modelli per la simulazione termoenergetica e metodi di analisi sperimentale (IEA-EBC Annex 65)", Politecnico di Torino -Dipartimento Energia,

RdS/PAR2013/109

- Capozzoli, S. Corgnati, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Perino, G. Serale "Sistemi impiantistici ad alta efficienza energetica operanti con basse differenze di temperatura: abaco delle soluzioni, metodi di dimensionamento e nuove tecnologie (IEA - EBC Annex 59)", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/110
- V. Chiesa, F. Frattini, M. Chiesa "Valutazione tecnico-economica delle soluzioni per l'efficienza energetica negli edifici della Pubblica Amministrazione", Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Gestionale, RdS/PAR2013/111
- D. Chiaroni, V. Chiesa, S. Franzò, F. Frattini "Analisi delle barriere che ostacolano l'accesso, da parte dei Comuni italiani, ai fondi disponibili a livello europeo e locale a supporto degli interventi di efficienza energetica nella PA", Politecnico di Milano - Dipartimento di Ingegneria Gestionale, RdS/PAR2013/112
- D. Testi, D. Della Vista, E. Schito, E. Menchetti, P. Conti, W. Grassi, G. Fasano, P. Signoretti "Sviluppo del SW SEAS per le diagnosi energetiche di ambienti ospedalieri dedicati alla degenza e Corsi informativi/formativi del Tool informatico semplificato per le diagnosi energetiche degli edifici", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni /ENEA, RdS/PAR2013/113
- R. Armani, M. Pietrobon, L. Pagliano "Definizione dei parametri per l'ottimizzazione di interventi di riqualificazione in considerazione del fattore costi/benefici", Politecnico di Milano - Dipartimento di Energia, RdS/PAR2013/114
- 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 ad uso ospedaliero", CRESME, RdS/PAR2013/115
- M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, V. Lo Brano, G. Maniscalco, M. Morale "Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana", Università di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici, RdS/PAR2013/116
- G. Riva, M. Sotte, G. Coccia "L'accumulo di energia termica quale importante strumento per la realizzazione di edifici NZEB", Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali, RdS/PAR2013/117
- A. Albo, F. Giustini, F. Gugliermetti, V. Sforzini "Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2013/118
- G. Cammarata, M. Cammarata, G. Capizzi "Sviluppo di metodologie e strumenti di misura ed analisi dei consumi energetici degli edifici pubblici", Università di Catania - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/119
- M. Zinzi, A. Mangione, G. Fasano "Studio preliminare per la definizione di una metodologia di calcolo per la determinazione del fabbisogno per illuminazione artificiale degli edifici", ENEA, RdS/PAR2013/120
- A. Poggio, G. Cerino Abdin, A. Crocetta, L. Degiorgis, M. Noussan, M. Fantino, G. Caragnano, M. Chiesa, F. Posca, P. Ruiu, R. Roberto "Progettazione di strumento di calcolo per la redazione del bilancio energetico territoriali", Politecnico di Torino - Dipartimento Energia /ENEA, RdS/PAR2013/121
- E. Santini, S. Elia "Studio e validazione di un modello previsionale di consumo energetico per la verifica dell'efficienza energetica dei centri sportivi", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2013/122
- E. Biele, D. Di Santo, G. Tomassetti "Linee guida per l'applicazione di piccole e medie reti di teleriscaldamento nei comuni in fascia climatica E e F", FIRE, RdS/PAR2013/123
- G. Fasano, F. Margiotta "Sviluppo di una metodologia per il labelling energetico di componenti trasparenti per l'involucro edilizio, lucernari e infissi", ENEA Associazione di categoria (ZENITAL), RdS/PAR2013/124
- F. Toso, A. Mura "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/PAR2013/126
- G. Fasano, M.G. Landi, G. Centi, F. Margiotta "Linee guida Contratti di Prestazione Energetica (EPC)", ENEA, RdS/PAR2013/127
- S. Agnoli, F. Cumo, A.M. Fogheri, E. Pennacchia, C. Romeo "Intervento dimostrativo di riqualificazione energetica in un edificio pubblico con destinazione d'uso scolastico", Università di Roma Sapienza - Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura (CITERA), RdS/PAR2013/128
- L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro "Definizione delle zone climatiche estive e della durata della stagione di climatizzazione estiva per gli edifici residenziali nel territorio italiano attraverso la metodologia dell'indice di severità climatica", ENEA, RdS/PAR2013/129
- E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco "Eco-greenroof & vertical greenery system.Validazione di modelli semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati", Università di Bari -Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali, RdS/PAR2013/131
- E. Biele, D. Di Santo, D. Forni, G. Tomassetti "Indagine sulla conoscenza e diffusione del teleriscaldamento nei comuni in zone E ed F e analisi dei dati di tre reti", FIRE, RdS/PAR2013/132
- F. Fantozzi, C. Bibbiani, C. Gargari "Analisi del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde per ottimizzare l'Efficienza Energetica degli edificio in area urbana", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2013/136
- **F**. Fantozzi, C. Bibbiani, C. Gargari "Parametri fisico-tecnici delle specie vegetali utilizzate per la realizzazione di tetti e pareti verdi nelle regioni mediterranee, per la realizzazione di un data-base specifico da utilizzare in programmi di

simulazione energetica degli edifici", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2013/137

- F. Fantozzi, C. Bibbiani, C. Gargari "Simulazione del comportamento energetico di un fabbricato-tipo in assenza/presenza di tetto/parete verde, per ottimizzare l'Efficienza Energetica degli edifici rispetto alle aree climatiche italiane", Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, RdS/PAR2013/139
- U. Mazzali, P. Ruggeri, F. Peron A. Daneo, M. Zinzi "Studio del comportamento radiativo e termico di componenti di involucro trasparenti produttori di energia", Università di Venezia IUAV - Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi / ENEA / SSV Murano Venezia, RdS/PAR2013/140
- R. Di Bonito, G. Giagnacovo, D. Biagiotti, C. Colletta, A. Latini, M. Scoccianti, C. Viola "Eco-sistemi vegetali per l'efficienza energetica e il risparmio di energia negli edifici urbani", ENEA, RdS/PAR2013/141
- T. Poli, A. G. Mainini, R. Paolini, A. Speroni, M. Zinzi "Valutazione parametrica delle prestazioni dell' involucro edilizio semitrasparente per illuminazione artificiale e climatizzazione estiva nel contesto Italiano", Politecnico di Milano - Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, RdS/PAR2013/142
- M. Zinzi, S. Agnoli, G. Fasano "Rapporto tecnico sulla comparazione tra standard e strumenti di calcolo per le prestazioni solari e luminose di componenti vetrati con accoppiamento di schermature solari", ENEA, RdS/PAR2013/143
- M. Zinzi, G. Fasano, C. Girardello "Caratterizzazione e applicazioni di cool materials per le chiusure verticali degli edifici", ENEA, RdS/PAR2013/144
- R. De Lieto Vollaro, E. Carnielo "Rapporto tecnico sulla metodologia di analisi degli apporti solari nel bilancio energetico degli edifici in funzione della risposta angolare della riflettanza solare dei componenti di involucro opaco", Università di Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Elettrica, RdS/PAR2013/145
- G. Fasano, F. Margiotta, G. Puglisi "Valutazione di applicabilità del metodo RTS come codice di calcolo per la certificazione energetica degli edifici", ENEA, RdS/PAR2013/146
- A. Disi, A. Amato "Utilizzo di ambienti virtuali di apprendimento per la formazione di tecnici nel settore dell'efficienza energetica", ENEA, RdS/PAR2013/147
- A. Disi, S. Del Bufalo, C. Vinci, L. Cifolelli, F. Pacchiano, A. Marchetti, G. Del Signore "Piano integrato di comunicazione", ENEA, RdS/PAR2013/148
- P. Zangheri, S. Fumagalli, G. Leonardi, V. Tarantini, A. Antonelli, M. Forni "Risultati delle prove sul nuovo standard per le performance degli apparecchi per la refrigerazione domestica", ENEA, RdS/PAR2013/149
- B. Baldissara, G. Fasano, M. Rao "Tool informatico per l'uso efficiente delle apparecchiature elettriche nel residenziale", ENEA, RdS/PAR2013/150
- F. Pacchiano "Piano di comunicazione per l'Efficienza Energetica", ENEA, RdS/PAR2013/152
- P. Mancini, L. Dini, M. Mazzoni, F. Baldassarri, A. Bura, L. Ciccone, D. Donnabella, A. Stanziano "EduchiAmo, InformiAmo, RisparmiAmo. Piano di comunicazione per un'Italia più consapevole e maggiormente rivolta al risparmio energetico e all'efficienza energetica", Università di Perugia - Dipartimento di Scienze Politiche, RdS/PAR2013/152

Progetto C.3
Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

- F. D'Annibale, G. Zummo (ENEA), C. Menale (Sapienza), F. Sfrattoni "Test sperimentali di nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare performance più elevate in termini velocità di risposta del pcm alla variazione di temperatura del fluido primario", ENEA /Università di Roma Sapienza /Universita' degli Studi "Guglielmo Marconi", RdS/PAR2013/156
- R. Bubbico, B. Loreti, C. Menale "Analisi teorica delle modalità di scambio termico tra acqua e pcm: studio parametrico delle principali variabili in gioco", Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente, RdS/PAR2013/157
- A. Mariani, N. Calabrese, M. Furrer "Studio e applicazione delle vapor chamber nei sistemi solari termici", ENEA, RdS/PAR2013/158
- P. Toninelli, A. Tolotto, D. Del Col, S. Dugaria, L. Moro "Modellazione di collettori solari termici a circolazione naturale con e senza vapor chamber e confronto tra risultati sperimentali ed output del modello", Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/159
- N. Calabrese, B. Cucca, P. Finocchiaro, M. Beccali "Prototipo di condizionatore d'aria compatto Solar DEC, sistema FRESCOO office: test funzionali", Università di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici /ENEA / Scuola Master F.lli Pesenti / SOLARINVENT SRL, RdS/par2013/160
- M. Beccali, V. Lo Brano, E. Moreci, P. Finocchiaro "Prototipo di condizionatore d'aria compatto Solar DEC, sistema FRESCOO residential: test funzionali", Università di Palermo - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli matematici / SOLARINVENT SRL, RdS/PAR2013/161
- V. Sabatelli, D. Marano, A. Ebolese, A. Bruno, C. Copeta "Sviluppo e validazione sperimentale di metodiche per la caratterizzazione ottica e termica di concentratori a media temperatura", ENEA
- M. Bortolato, D. Del Col, A. Aboulmagd, S. Bortolin, S. Dugaria, E. Magro "Sviluppo e sperimentazione di ricevitore a microcanali per concentratore solare parabolico", Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/163

- N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno, G. Boccardi, M. Pieve, G. Ponticorvo “Test sperimentali in calorimetro enea di due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R290 ed R134a”, ENEA, RdS/PAR2013/164
- F. Botticella, R. Mastrullo, A.W. Mauro “Analisi delle prove sperimentali su due prototipi di macchine a compressione di vapore ad R134a e propano: valutazione delle prestazioni stagionali e del conseguente impatto ambientale diretto e indiretto”, Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale/ Università del Sannio, RdS/PAR2013/165
- N. Calabrese, A. Lattanzi, R. Trinchieri, P. Rovella, C. Piazzolla, M. Vio, M. Pozzati, L. Scalambrin “Studio teorico-sperimentale sull’ottimizzazione del funzionamento di pompe di calore a CO_2 (R744) con radiatori ad elevato salto termico”, ENEA / Università della Calabria / Università di Roma Tre / IRSAP, RdS/PAR2013/166

Progetto C.4
Prodotti e processi per il miglioramento dell’efficienza energetica nell’elettromobilità

- M. Bertoluzzo, G. Buja “Progetto e sperimentazione di un caricabatteria contactless per city car elettrica”, Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale, RdS/PAR2013/098
- G. Tomasso, M. Di Monaco, M. D’Arpino, U. Abronzini “Progetto e sperimentazione di un caricabatteria contactless per city car”, Università di Cassino - Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, RdS/PAR2013/099
- S. Bodoardo, R. Bojoi, I. Doberdò, A. Tenconi, S. Vaschetto “Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid”, Politecnico di Torino - Dipartimento Energia, RdS/PAR2013/100
- G. Giuli, M. Mancini “Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani”, ENEA, RdS/PAR2013/101
- S. Orchi, F. Ortenzi, G. Valenti, M.P. Valentini, V. Fabrizi “Analisi di elettrificazione del TPL in contesti ITC: lo smart ring dell’Aquila”, ENEA, RdS/PAR2013/102
- A. Genovese, B. Di Pietra, D. Sbordone “Sperimentazione per la compensazione dell’energia reattiva con la stazione di ricarica integrata presso il CR Casaccia”, ENEA / Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica, RdS/PAR2013/103
- R. Pinto, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla “Caricabatteria contactless per city car: caratterizzazione sperimentale e misure radiometriche dei campi elettromagnetici residui per la valutazione dell'esposizione occupazionale”, ENEA, RdS/PAR2013/104
- A. Genovese “Comunicazione e diffusione dei risultati”, ENEA, RdS/PAR2013/216

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all’indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-sistema-elettrico



Abbreviazioni ed acronimi

AC	Alternating current
a/c	Rapporto acqua/cemento
ACS	Acqua calda sanitaria
AdP	Accordo di Programma
ADS	Accelerator Driven System
AF	Alta frequenza
AFM	Microscopia a forza atomica
AGATUR	Advanced GAs TUrbine Rising
AIT	Aluminium Induced Texture
ALFRED	Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator
AMP	2-ammino-2-metil-propanolo
a-Si:H	Silicio amorfo idrogenato
ASTRID	Advanced Sodium Test Reactor for Industrial Demonstration
AZO	Ossido di zinco drogato con alluminio
B	Campo magnetico
BA	Broader Appproach
BDBA	Beyond Design Basis Accident
BCPs	Copolimeri a blocchi
BEM	Basic Ensemble Method
BEMS	Building Energy Management Systems
BER	Bit Error Rate
BEV	Battery Electric Vehicle
BIPV	Building-Iintegrated PhotoVoltaic
BP	Blackplate
BT	Bassa tensione
BTL	Biomass to Liquid
BWR	Boiling Water Reactor
c.a.	Corrente alternata
c.c.	Corrente continua
C.R.	Centro Ricerche
CAES	Compressed Air Energy Storage
CC	Corrente costante
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEM	Clean Energy Ministerial
CFD	Computational Fluid Dynamics
CGE	Cold Gas Efficiency
CGS	Carbon Geological Sequestration
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Seleniuro rame-indio-gallio
CIRCE	CIRcolazione Eutettico
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
CIS	Rame-Indio-Selenio
CMC	Carbossimetil cellulosa
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
COD	Chemical Oxygen Demand
COP	Coefficient Of Performance
CPB	Cooled Packed Bed
CPC	Compound Parabolic Concentrator
CR	Rapporto di capacità
CRESCO	Centro computazionale di RicErca sui Sistemi COmplessi
CS	Solenoide centrale
c-Si	Silicio cristallino
CSP	Concetrating Solar Power (impianti solari a concentrazione)
CSTR	Completely Stirred Tank Reactor, reattore a serbatoio agitato
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
DEC	Desiccant Evaporative Cooling
DFT	Density Functional Theory
DGGE	Denaturing Gradient Gel Electrophoresis
DHR	Decay Heat Removal
D.Lgs	Decreto legge
DNI	Direct Normal Irradiation
DNS	Direct numerical Simulation
DP	Doppio pancake
dpa	Displacement per atom
DRP	Divertor Test Platform
DSA	Deterministic Safety Analysis
DSC	Calorimetria differenziale a scansione
DSP	Processore digitale di segnali
DSS	Decision Supporter System
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
EBR-II	Experimental Breeder Reactor II
ECBM	Enhanced Coal Bed Methane
ECMWF	Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine
ECU	Unità elettronica di controllo
E_{DH}	District heating global efficiency
EDS	Energy dispersion spectroscopy
EER	Energy Efficiency Ratio
EERA	European Energy Research Alliance
E_g	Gap di energia
EG	Etilenglicol
EGE	Efficienza elementare di gassificazione
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ELTL	EVEDA Lithium Test Loop
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia, e lo sviluppo economico sostenibile
EPC	Contratto di rendimento energetico
EQE	Efficienza quantica esterna
ER	Rapporto di equivalenza
ERANOS	European Reactor ANalysis Optimized System
ESCo	Energy Saving Company
ESNII	European Sustainable Nuclear Industrial Initiative
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	Fotobioreattore
FDD	Fault Detection and Diagnostic
FDS	Fast Disconnecting System
FEM	Metodo elementi finiti
FF	Fill factor
FIB	Focused Ion Beam
FIRE	Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia
FM	Forza elettromotrice
FPPC	Controllo veloce posizione plasma
FRESCOO	FREE Solar COOling
FT	Fischer-Tropsch
FT-IR	Spettroscopia IR in trasformata di Fourier
FTU	Frascati Tokamak Upgrade
FV	Fotovoltaico
g	Fattore dì trasmissione dell'energia solare totale (fattore solare)
g.	giorno
GD	Generazione distribuita
GESSYCA	Generatore Sperimentale di Syngas da Carbone
GGE	Efficienza globale di gassificazione
GHSV	Gas Hourly Space Velocity

GIF	Generation IV International Forum
GIS	Geographic Information System
GO	Graphene oxide, ossido di grafene
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GRID	Sistema di vetrazione basso emissivo/standard con anteposto un sistema statico di schermatura bidirezionale
GUI	Graphical User Interface
GUINEVERE	Generation of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor
GWP	Global warming potential
GZO	Ossido di zinco drogato gallio
HERO	Heavy liquid mEtal-pRessurized water cOoled tube
HFC	Idrofluorocarburi
HRT	Tempo di ritenzione idraulica
HSM	Heat Storage Material
HTF	Heat Thermal Fluid
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
HYP	Resa potenziale di idrogeno
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBAD	Ion Beam Assisted deposition
IDPSA	Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis
IEA	International Energy Agency
IFERC	International Fusion Energy Research Center
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
IGD-TP	Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform
ILCD	International Life Cycle Data
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
JRC	Joint Research Center
J_{sc}	Densità di corrente di corto circuito
JT-60SA	JAEA Tokamak 60 Super Advanced
k	Coefficiente di estinzione
KPI	Key Performance Indicators
LBE	Eutettico piombo-bismuto
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Local control cubicle
LDS	Luminescent Down Shifting
LEADER	Lead European Advanced Demonstrator Reactor
LEB	Local Energy Balance
LED	Light emitting diode
LES	Large Eddy Simulation
LFP	Litio ferro fosfato
LFR	Lead Fast Reactor
LIB	Batteria al litio
LIFUS	LIthium FUSion
LOCA	Loss of coolant accident (Incidente di perdita di refrigerante)
LOOP	Loss of offsite power
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
LTO	Titanato di litio
LTSM	Localized turbulent scale model
LWR	Light water reactor (reattori ad acqua leggera)
MA	Attinidi minori
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MEA	Monoetanolammina (C_2H_7NO)
MICOS	Multipurpose Installation for COmbustion Studies
MIUR	Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition
MOX	Combustibile ad ossidi misti
MSE	Ministero dello Sviluppo Economico

MT	Media tensione
n	Indice di rifrazione
NACIE	Natural Circulation Experiment
NEA	Nuclear Energy Agency
NEZB	Nearly Energy Zero Building
NM2P	N-metil-2-pirrolidone
NOEL	Natural Ocean Engineering Laboratory
NORC	Non Organic Rankine Cycle
NPP	Nuclear Power Plant
NPV	Valore netto dell'investimento
NRC	Nuclear Regulatory Commission
NSS	Nuclear Security Summit
OCV	Potenziale a circuito aperto
ODC	Optical Diagnostic of Combustion
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLA	Oleilammina
OLED	Organic light emitting diode
OLR	Organic Loading Rate
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
p-a-Si	Silicio amorfo drogato p
PBT	Tempo di rientro dell'investimento
PCA	Pool Critical Assembly
PCL	Power Line Communication
PCM	Phase Change Material (materiale a cambiamento di fase)
PCS	Prova Componenti Solari
PdC	Pompa di calore
PDF	Probability density function
PDL	Deposizione per ablazione laser
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PEN	Portable Electronic Nose
PES	Primary Energy Saving
PEWEC	PEndulum Wave Energy Converter
P&T	Partitioning & Transmutation
PF	Campo poloidale
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PHWR	Pressurized heavy water reactor
PID	Proporzionale-Integrale-Derivativo
PLC	Programmable Logic Controller
PM	Peso molecolare
PMMA	Polimetilacrilato
PS	Polistirene
PSA	Probabilistic Safety Assessment
PTO	Power-take off
PVAc	Polivinilacetato
PVD	Physical vapor deposition
PVdF	Polivinilenfluoruro
PWR	Pressurized Water Reactors (reattore ad acqua pressurizzata)
QSF	Quasi Snow-Flake
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RCW	Relative Capture Width
RdP	Rapporto di produzione
RdS	Ricerca di Sistema
Re	Numero di Reynolds
RF	Radio frequenza
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
REWEC	Resonant Wave Energy Converter
RGO	Reduced Graphene Oxide (ossido di grafene ridotto)
RH	Remote Handling
R_h	Riflettanza emisferica

RIE	Reactive Ion Etching
RMS	Root-Mean Square Roughness (rugosità quadratica media)
RPP	Rendimento di primo principio
RSE	Ricerca di Sistema Energetico
RWC	Relative Capture Width
SBO	Station Black-out
SC	Rapporto vapore-carbone
SCB	Static Circuit Breaker
sccm	Standard cubic centimeters per minute
SCOOP	Coefficiente di prestazione stagionale, in modalità pompa di calore
SCWG	Gassificazione con acqua in condizioni supercritiche
SDS	Schede di sicurezza
SEAS	Software Energetico per Audit Semplificati
SEER	Coefficiente di prestazione stagionale, in modalità macchina frigo
SEI	Solid electrolyte interphase
SEM	Scanning electron microscopy
SEN	Strategia Energetica Nazionale
SERP	Sorption-Enhanced Reforming Process
SEWGS	Sorption Enhanced Water Gas Shift
Set-Plan	Strategic Energy Technology Plan
SG	Steam generator (Generatore di vapore, GV)
SH&C	Solar Heating and Cooling
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient
SHRT	Shutdown Heat Removal Test
SMES	Superconducting magnetic energy storage
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
ss	Sostanza secca
SSE	Sottostazione elettrica
SSFC	Semi-Solid Flow Cell
STEESC	Sistemi di Trasferimento dell'Energia Elettrica Senza Contatto
SUI	Surface User Interface
SW	Software
TAT	Triazatruxeni
TCD	Rivelatore a conducibilità termica
TCO	Ossido conduttivo trasparente
TDLAS	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy
TEM	Microscopia elettronica a trasmissione
TES	Thermal Energy Storage
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TF	Campo toroidale
TGA	Analisi termogravimetrica
THD	Distorsione armonica totale
TIG	Tungsten Inert Gas
TIR	Tasso interno di rendimento
TLR	Teleriscaldamento
TOC	Carbonio organico totale
TPL	Trasporto Pubblico Locale
TRY	Test Reference Year
TUI	Tangible User Interface
TVC	Trapped Vortex Burner
U	Trasmittanza
UGR	Unified Glare Rating (Indice unificato di abbagliamento)
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
USC	Ultra-SuperCritico
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
V&V	Validazione e verifica

VHF	Very high frequency
VLS	Vapor-Liquid-Solid
V_{oc}	Tensione a circuito aperto
VS	Solidi volatili
V2G	Vehicle to Grid
WAM	WAve prediction Model
WBG	Wide Band Gap
WEC	Wave Energy Converter
WGS	Water Gas Shift
WWR	Window to Wall RAtio
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction
ZEB	Zero Energy Building
ZECOMIX	Zero Emission COal MIXed
τ_{sol}	Fattore di trasmissione solare
τ_{vis}	Fattore di trasmissione visibile

Edito dall'ENEA
Servizio Comunicazione
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
www.enea.it
Copertina: Cristina Lanari
Gennaio 2015

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

Ministero dello Sviluppo Economico

