AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Ministero dello Sviluppo Economico

Accordo di Programma MSE/ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del terzo anno di attività

A cura di
Marina Ronchetti

Con i contributi di
M. Conte, M. Sepielli, P. Meloni, M. Tarantino, A. Pizzuto
A. Cucchiaro, V. Pignatelli, P. Delli Veneri, G. Sannino, S. Giammartini,
I. Bertini, S. Fumagalli, G. Fasano, N. Calabrese, G. Barbieri

NOVEMBRE 2012

Accordo di Programma MSE-ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO
Risultati del terzo anno di attività

A cura di *Marina Ronchetti*

con i contributi di
Mario Conte, Massimo Sepielli, Paride Meloni, Mariano Tarantino, Aldo Pizzuto, Antonio Cucchiaro, Vito Pignatelli, Paola Delli Veneri, Gianmaria Sannino, Stefano Giammartini, Ilaria Bertini, Simonetta Fumagalli, Gaetano Fasano, Nicolandrea Calabrese, Giuseppe Barbieri

2012 ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile

Lungotevere Thaon di Revel, 76
00196 Roma

ISBN 978-88-8286-274-9

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

Accordo di Programma MSE-ENEA 2009-11

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Risultati del terzo anno di attività

a cura di

Marina Ronchetti

con i contributi di

M. Conte, M. Sepielli, P. Meloni, M. Tarantino, A. Pizzuto, A. Cucchiaro, V. Pignatelli, P. Delli Veneri, G. Sannino, S. Giammartini, I. Bertini, S. Fumagalli, G. Fasano, N. Calabrese, G. Barbieri

Novembre 2012

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento ai colleghi che hanno partecipato all'elaborazione della pubblicazione:

Vincenzo Cincotti
Vincenzo Gerardi
Agostino Iacobazzi
Rosa Provaroni

Indice

Presentazione 7

GOVERNO, GESTIONE E SVILUPPO DEL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

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

Nuovo nucleare da fissione:collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare 75
Responsabile scientifico: Massimo Sepielli, Paride Meloni, Mariano Tarantino

Fusione nucleare: Attività di fisica della fusione complementari a ITER 131
Responsabile scientifico: Aldo Pizzuto

PRODUZIONE DI ENERGIA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti 157
Responsabile scientifico: Vito Pignatelli

Ricerca su celle fotovoltaiche innovative 215
Responsabile scientifico: Paola Delli Veneri

Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine e moto ondoso 251
Responsabile scientifico: Gianmaria Sannino

Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO_2 267
Responsabile scientifico: Stefano Giammartini

RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA

Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi 323
Responsabile scientifico: Ilaria Bertini

Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici.. 389
Responsabile scientifico: Simonetta Fumagalli

Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile 429
Responsabile scientifico: Gaetano Fasano

Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva 455
Responsabile scientifico: Nicolandrea Calabrese

Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto 513
Responsabile scientifico: Giuseppe Barbieri

Elenco documenti tecnici 589

Abbreviazioni ed acronimi 601

Presentazione

Il presente volume riporta i risultati delle attività svolte dall'ENEA, in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (27 Università con 53 dipartimenti coinvolti) e le società partecipate Sotacarbo ed FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, nella terza annualità (PAR 2011) dell'Accordo di Programma 2009-11 con il Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

La Ricerca di Sistema Elettrico è un insieme complesso di attività finalizzate all'innovazione del Sistema Elettrico Nazionale per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale ed assicurare al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico (2009-11), il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato una serie di Accordi di Programma con vari soggetti, tra cui l'ENEA.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo (gestito dalla Cassa Conguaglio per il settore elettrico) alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene periodicamente stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

La Ricerca di Sistema prevede sia temi di ricerca fondamentale che studi di carattere sistemico e prenormativo. Le attività sviluppate e i risultati scientifici ottenuti sono a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale, sono quindi interamente pubblici e vengono divulgati mediante un apposito piano di diffusione.

Le attività hanno riguardato 12 progetti di ricerca e sono svolte all'interno delle tre areeprioritarie previste dal Piano Triennale:

- Area "*G*overno, gestione e sviluppo del sistema elettrico" che comprende le attività relative all'accumulo elettrico e quelle sull'energia nucleare.

  Nell'annualità oggetto del presente documento sono proseguite le attività finalizzate all'accumulo di energia elettrica, essenziali per la diffusione delle fonti rinnovabili caratterizzate da forte discontinuità temporale e continuano le attività sul nuovo nucleare da fissione, che vengono concentrate su tre linee di attività principali: studi sul nuovo nucleare in ambito internazionale, studi di sicurezza sugli impianti nucleari e reattori di IV Generazione, per tenere conto delle necessità di ricerca nel settore, alla luce anche di quanto accaduto lo scorso marzo in Giappone e degli indirizzi di politica nazionale e comunitaria.

  Per quanto riguarda la fusione, sono continuate le attività, iniziate nel PAR 2010, sul Broader Approach, con lo sviluppo di ricerche di base sulla fisica e la tecnologia della fusione, finalizzate alla realizzazione del magnete superconduttore di una macchina Tokamak denominata JT-60SA, alla progettazione e costruzione di un bersaglio per IFMIF (International Fusion Irradiation Facility) per la produzione di neutroni e allo sviluppo di materiali compositi avanzati per applicazioni ad alte temperature.

  Nell'ambito dei programmi internazionali a supporto della realizzazione di ITER (la macchina tokamak che sarà costruita a Cadarache, Francia, frutto di una collaborazione internazionale tra EU, Cina, Giappone, Russia, India, Corea, USA), è stata iniziata una prima attività di studio e ricerca finalizzata alla realizzazione di un esperimento di fusione denominato FAST di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER.

- Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente" che comprende attività su produzione da biomasse e scarti, fotovoltaico innovativo, studi sulle correnti marine e tecnologie innovative per l'utilizzo del carbone. Sono state svolte ricerche sull'utilizzo di biomasse disponibili localmente per la produzione di energia e l'impiego del biogas in metanodotti; sul fotovoltaico avanzato (film sottili innovativi, film sottili policristalini a base di Cu_2-II-IV-VI_4, celle organiche); sulla produzione di energia dalle correnti marine; sullo studio delle tecnologie di CCS come strada per un utilizzo sostenibile del carbone.
- Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica" con attività finalizzate all'efficienza energetica nei settori dei servizi, dell'illuminazione pubblica, del civile residenziale e non e nel settore della climatizzazione, con interventi di sviluppo tecnologico e la realizzazione di dimostrativi sperimentali. In particolare le attività sui mezzi di trasporto hanno riguardato sia studi e sviluppi sulla componentistica che attività di ricerca di base e sperimentazione su nuovi materiali più leggeri in grado di contribuire a ridurre i forti consumi energetici del settore.

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

Vincenzo Porpiglia
Responsabile Unità di Progetto
Ricerca di Sistema Elettrico

Sistemi avanzati di accumulo di energia

I sistemi di accumulo sono considerati una tecnologia indispensabile nell'evoluzione tecnica ed economica del sistema di generazione, distribuzione ed usi finali dell'energia elettrica. I sistemi elettrici stanno evolvendo verso un più ampio uso di tecnologie digitali (smart grid) per una crescente integrazione di una varietà di fonti primarie (generazione distribuita, GD), con una crescente quota di fonti rinnovabili, non programmabili. La necessità di garantire un maggiore controllo delle fasi di produzione con quelle della domanda di energia anche nell'ottica di un mercato aperto e libero nella commercializzazione dell'energia elettrica, sta rendendo le tecnologie dell'accumulo sempre più promettenti ed utili per migliorare il rendimento, la gestione, la qualità e ridurre i costi dell'energia elettrica prodotta ed utilizzata.

Nel caso specifico della crescente integrazione delle fonti rinnovabili nelle reti elettriche, l'uso dei sistemi di accumulo può significativamente migliorare le prestazioni tecniche ed economiche delle smart grid in cui tali sistemi sono inseriti. In tal caso, ci sono altre funzioni, aggiuntive a quelle già note (power quality, peak shaving, regolazioni di tensione o frequenza, ecc.), che i sistemi di accumulo possono svolgere per rendere ancora più favorevole l'utilizzo delle fonti rinnovabili:

- uso dell'energia da fonti rinnovabili in periodi di maggiore convenienza (spostamento temporale tra produzione e utilizzo);
- disponibilità della capacità produttiva (potenza costante connessa alla rete) delle fonti rinnovabili (principalmente impianti eolici e fotovoltaici) in modo da rinviare la necessità di realizzazione di nuovi impianti convenzionali;
- integrazioni di impianti eolici di breve (fino a qualche minuto) o lunga durata (fino a qualche ora).
- Le molteplici funzioni sopra indicate richiedono sistemi e metodi di accumulo significativamente diversi. Negli ultimi anni, sono stati sviluppati ed applicati diversi metodi di accumulo con tecnologie appositamente studiate: accumulo di acqua in bacini di pompaggio; volani (flywheels), accumulo di aria compressa in caverne (CAES, Compressed Air Energy Storage); magneti superconduttori (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage); batterie elettrochimiche; supercondensatori; accumulo di energia termica e più recentemente, accumulo d'idrogeno in abbinamento con le celle combustibile.

La forma più diffusa di accumulo dell'energia elettrica (non però per le reti elettriche), particolarmente indicata per applicazioni di alta potenza e di bassa energia, è certamente quella elettrochimica (batterie e supercondensatori). Tuttavia gli accumulatori elettrochimici presentano prestazioni (in termini di capacità di accumulo e di caratteristiche di ricarica) limitate e decrescenti con il numero di cicli di carica/scarica. Diverse soluzioni sono state proposte ed utilizzate, ma ulteriori attività di ricerca e di validazione sperimentale in applicazioni reali alle reti elettriche con fonti rinnovabili si rendono necessarie, in modo da coprire diverse taglie di applicazioni e differenti funzioni. Le batterie più interessanti sono attualmente, oltre a quelle ormai convenzionali al piombo ed alcaline, quelle al litio, ad alta temperatura ed a flusso.

Alcune di queste batterie (alta temperatura come le Zebra o quelle a flusso) sono state già oggetto di studio in precedenti piani annuali di realizzazione della Ricerca di Sistema, da parte principalmente di RSE. Inoltre stanno acquistando maggiore interesse ed importanza per le applicazioni di elevata potenza ed alto rendimento (per power quality, regolazioni di frequenza o riduzione delle potenze di picco - peak shaving) i supercondensatori e, in minor misura, la produzione e l'accumulo d'idrogeno per un uso successivo con le celle a combustibile. La scelta del sistema e, eventualmente, la sua possibile integrazione per disaccoppiare potenza ed energia, devono essere opportunamente studiate e verificate.

Questi dispositivi elettrochimici hanno finora avuto un limitato sviluppo per le applicazioni nelle reti elettriche con la messa in servizio di alcuni impianti di taglia medio-grande (fino a decine di MW, basati principalmente su batterie convenzionali al piombo e qualche applicazione di batterie sodio-zolfo ad alta temperatura in Giappone e Stati Uniti).

Il progetto intende promuovere la disponibilità industriale di batterie al litio e valutare in condizioni di reale utilizzo le soluzioni più convenienti da un punto di vista tecnologico ed economico, sia per l'utente finale sia per il settore industriale e il gestore/fornitore del servizio, in linea con quanto previsto dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale. Nel progetto sono incluse inoltre attività di sviluppo e sperimentazione di componenti (elettronica di interfaccia e controllo) ed interi sistemi in peculiari situazioni applicative (la casa

attiva). Si è infine deciso, in conformità a una specifica richiesta dei valutatori del programma di attività, di inserire uno studio preliminare sulle possibilità di utilizzazione nella rete italiana di sistemi di accumulo non elettrochimico e non convenzionale, quali, a titolo puramente esemplificativo, i serbatoi per aria compressa (CAES).

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il prodotto di questa attività è la ricerca e lo sviluppo di materiali e processi per stimolare una successiva produzione industriale di batterie al litio per applicazioni stazionarie (ed anche mobili); la progettazione e realizzazione e prova di soluzioni tecnologiche avanzate per l'interfaccia verso la rete (e verso eventualmente i veicoli elettrici) in un'ottica di smart grid; la disponibilità di dati e progetti esemplificativi dei vantaggi e delle possibilità reali di introduzione di sistemi di accumulo in batterie nel sistema elettrico nazionale in accoppiamento con l'uso delle fonti rinnovabili ed anche dei veicoli elettrici, con l'aggiunta di uno studio preliminare delle potenzialità applicative alla rete elettrica italiana di sistemi di accumulo diversi da quelli elettrochimici.

Il progetto su scala triennale è strutturato su tre linee di attività principali che prevedono:

- *ricerca fondamentale su batterie a litio* (almeno di due tipologie diverse) per arrivare alla progettazione, realizzazione e prova di celle da laboratorio di scala significativa per applicazioni stazionarie nelle reti elettriche e mobili per veicoli elettrici a più alto rendimento energetico e più compatibili con eventuali ricariche rapide; queste batterie dovranno avere prestazioni, affidabilità e costi molto diversi da quelle attualmente disponibili sul mercato;
- *ricerca fondamentale sulle tecnologie di controllo e di interfaccia con la rete*, con una valutazione tecnica ed economica delle diverse tipologie di accumulo nell'ottica di una loro integrazione con impianti a fonti rinnovabili con particolare attenzione alle applicazioni nella distribuzione ed negli usi finali, dove sono potenzialmente più interessanti e competitive le caratteristiche delle batterie rispetto ad altri sistemi di accumulo;
- *progettazione e realizzazione prototipale di* soluzioni *impiantistiche ottimizzate per diverse applicazioni*, anche in accoppiamento con supercondensatori, atte a migliorare l'efficienza energetica e il valore economico dei sistemi di generazione ed utilizzo con fonti rinnovabili, includendo anche la possibilità di valutazione dell'interfaccia con varie utenze finali, quali utenze domestiche e reti di ricarica per veicoli a trazione elettrica; lo studio di altri sistemi avanzati di accumulo di energia, quali, ad esempio, supercondensatori elettrochimici e sistemi di accumulo termico con valutazione delle potenzialità applicative anche mediante verifiche sperimentali.

Nel periodo previsto dal PAR 2011, sono state condotte attività su tutte e tre le linee, in particolare proseguendo ed intensificando le attività di ricerca sui materiali per le batterie al litio, completando la progettazione, realizzazione e prova del sistema di gestione e controllo del sistema di accumulo verso le reti elettriche ed infine, completando le attività sperimentali di verifica della "casa attiva". Infine sono stati svolti alcuni studi di supporto, quali quello previsto per la definizione di procedure di prova per la valutazione della "second life" delle batterie al litio - cioè, la possibile riutilizzazione di batterie al litio considerate esaurite nei veicoli elettrici ed ibridi ed in grado di garantire una possibile estensione della vita operativa in applicazioni stazionarie - ed infine lo studio preliminare, inizialmente non preventivato, di valutazione delle potenzialità applicative di sistemi di accumulo alternativi a quelli elettrochimici.

Sono poi proseguite le attività di collaborazioni internazionali sia in ambito Agenzia Internazionale dell'Energia (AEI), che in alcune collaborazioni europee (EERA e COST) e nazionali volte alla diffusione dei risultati ai vari settori industriali interessati. E' inoltre in fase di definizione la partecipazione al CEM (Clean Energy Ministerial), un forum dei ministri di energia ed ambiente, che hanno lanciato varie iniziative di collaborazione, tra cui quella sui veicoli elettrici e le smart grid.

Infine, è diventata operativa la collaborazione con il CNR e RSE nel Gruppo di Lavoro per il Coordinamento dei Progetti "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo di energia elettrica", - le procedure di prova condivise per materiali, celle e batterie complete – sono state nelle attività sperimentali di laboratorio svolte in questo anno sui materiali e le celle al litio.

Il progetto si articola in sette obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

RICERCA FONDAMENTALE SU BATTERIE A LITIO

A. Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali catodici con prestazioni migliorate

L'attività prevedeva la ricerca di materiali catodici per celle al litio adatti per le applicazioni nelle reti elettriche, scelti per rispondere ad esigenze di alte prestazioni (potenza ed energia), basso costo e basso impatto ambientale. I materiali selezionati durante lo scorso anno sono stati ottimizzati, in base ai risultati sperimentali ottenuti in celle complete da laboratorio (Obiettivo C) e prodotti in scala utile per la realizzazione di altre celle da laboratorio. Inoltre sono stati studiati anche nuovi materiali catodici per lo sviluppo di batterie litio-ione di più elevata energia specifica rispetto a quelle sul mercato ed operanti con elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e sali di litio. Sono stati poi studiati catodi compositi per batterie allo stato solido prive di liquido. La composizione dei nastri catodici è stata verificata in funzione della natura e del contenuto dei vari componenti al fine di ottenere porosità (mediante picnometria ad elio), conducibilità ionica ed elettronica (impedenza complessa) e comportamento termico (TGA) ottimali per applicazioni in batterie litio-ione. Tutti i materiali acquisiti e/o prodotti sono stati caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Le caratterizzazioni elettrochimiche hanno utilizzato le procedure concordate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE.

Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Bologna e l'Università di Roma "La Sapienza".

L'Università di Bologna si è concentrata sullo sviluppo di materiali catodici a base di $LiMnPO_4$ per la realizzazione di batterie litio-ione che operando con elettroliti convenzionali abbiano un'energia specifica superiore a quella delle batterie sul mercato. Il $LiMnPO_4$ appartiene alla famiglia delle olivine come il $LiFePO_4$ che è già utilizzato in batterie commerciali, ed è quindi dotato delle stesse promettenti caratteristiche, come stabilità chimica e termica, basso costo e non tossicità. Presenta inoltre un più elevato potenziale di intercalazione del litio, 4,1 V *vs.* Li rispetto 3,4 V del fosfato di ferro, a parità di capacità specifica teorica (170 mAh/g), il che consente potenzialmente lo sviluppo di batterie litio-ione che, pur operando con elettroliti organici convenzionali (miscele di carbonati organici e $LiPF_6$ come sale di litio), hanno un'energia specifica più elevata di circa il 20%. Il $LiMnPO_4$, come tutti i fosfati, è dotato di una bassa conduttività; allo stato attuale della ricerca le sue capacità di accumulo di carica e stabilità al ciclaggio sono inferiori rispetto a quelle del $LiFePO_4$ e questo è generalmente attribuito alla bassa conducibilità ionica ed elettronica dovuta alla deformazione Jahn-Teller intorno al Mn^{3+} che produce un "*mismatch*" fra le due fasi $LiMnPO_4$ e $MnPO_4$. Un notevole miglioramento delle prestazioni è stato osservato con fosfati misti di manganese e ferro $LiMn_{1-x}Fe_xPO_4$, anche a basse concentrazioni di Fe, per quanto qualche esempio di buone prestazioni è riportato anche nel caso di solo $LiMnPO_4$.

La ricerca ha incluso la sintesi di polveri di $LiMnPO_4$ e di $LiMn_{0,8}Fe_{0,2}PO_4$ ricoperte di carbone, la loro caratterizzazione strutturale e morfologica, la preparazione degli elettrodi con i materiali sintetizzati e la loro caratterizzazione elettrochimica in semicelle vs. litio ed in configurazione di batteria litio-ione con anodi sviluppati da altri partner, in elettroliti convenzionali a base di miscele di carbonati organici e $LiPF_6$ ed anche in nuovi elettroliti liquidi e polimerici in vista di ulteriori nuovi sviluppi.

Due sono le tipologie di sintesi seguite: sintesi sol-gel in acqua, sia partendo da precursori non totalmente solubili (sol-gel I), che rappresenta un'ottimizzazione di una delle sintesi proposte il precedente anno, che da precursori totalmente solubili (sol-gel II) e sintesi con la tecnica dei polioli. La caratterizzazione elettrochimica include cicli di carica (CC-CV) - scarica (CC) a diverse C-rate e diversi cut-off di potenziale a due temperature, e test per la valutazione della capacità di carica, di scarica e della stabilità delle celle a ripetuti cicli, condotti anche secondo protocolli concordati con ENEA.

L'Università di Roma si è concentrata sullo studio sperimentale di materiali catodici nanostrutturati, in prosecuzione dell'attività avviata con il PAR 2008-2009, per batterie al litio e litio-ione per applicazioni di potenza attraverso la caratterizzazione elettrochimica. Lo studio condotto ha visto la caratterizzazione elettrochimica di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ come materiale catodico. La sintesi del fosfato di litio, manganese e ferro cristallino nanostrutturato ($LiMn_xFe_{1-x}PO_4$, con $0 < x < 1$), partendo dal fenilfosfonato di ferro (II) e del fenilfosfonato di manganese (II) con carbonato di litio doveva portare alla formulazione dell'$LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ con una carica di carbone nanostrutturato derivante dalla decomposizione della componente organica dei precursori. Tale carbone oltre a migliorare il contatto elettrico tra le particelle funziona da volano per l'ottenimento di particelle nanostrutturate di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$. L'introduzione di Mn nella struttura olivina, con drogaggi di piccola entità (5-10% in moli), è stata fatta per incrementare la conducibilità intrinseca del materiale catodico, mentre, la sostituzione massiccia del ferro(II) della Triphylite con il manganese(II) per ottenere un aumento del potenziale di scarica maggiore di 3,6 V, e quindi dell'energia specifica della batteria. I catodi sono stati preparati seguendo una procedura standard, per via "umida" mediante deposizione sulla rete di alluminio di un impasto ottenuto da un adeguato mescolamento di

materiale attivo, conduttore elettronico (carbon black) e il PVDF (polivinildenfluoruro) come legante. Le ciclazioni galvanostatiche sui diversi materiali e la spettroscopia di potenziale hanno consentito di valutare i valori di capacità e i potenziali di scarica e carica dei diversi materiali. L'obiettivo è stato quello di ottenere una formulazione ottimizzata per $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ sintetizzato a partire dal fenilfosfonato di ferro (II) e manganese (II) per prestazioni migliori in cella rispetto a quelle di $LiFePO_4$.

Le attività svolte da ENEA erano infine mirate alla ricerca di una procedura semplice ed economica per la produzione di materiale catodico a base di $LiFePO_4$ tale da essere utilizzato in batterie litio ione per l'accumulo di potenza ed energia. Come fonte di ferro è stato utilizzato il solfato ferroso eptaidrato. Lo studio del materiale prescelto, tra i più utilizzati attualmente, e dei relativi processi di preparazione ha consentito di effettuare una valutazione del valore economico dei materiali sviluppati negli anni precedenti, con particolare attenzione al litio ferro fosfato ($LiFePO_4$), per iniziare a capire le potenzialità anche economiche di applicazione di batterie al litio nelle reti elettriche.

Principali risultati

Il $LiMnPO_4$/C, sintetizzato dall'Università di Bologna [Report RdS/2012/235] a partire da precursori totalmente solubili (sol-gel II) in rapporto stechiometrico, con esclusione del chelante-precursore del carbone (acido citrico 2:1), ha mostrato un comportamento significativamente superiore rispetto al $LiMnPO_4$ preparato nella precedente annualità, da diversi precursori e con differenti procedure di sintesi.

Le polveri del materiale sintetizzato sono state caratterizzate mediante analisi XRD, SEM, HRTEM con abbinata X-EDS e TGA. La Figura 1 mostra il diffrattogramma di $LiMnPO_4$/C (M100-II): tutti i picchi sono caratteristici del prodotto atteso (a parte quello relativo ad una impurezza di MnO) e questo dimostra l'efficacia delle sintesi; la dimensione dei cristalliti valutata mediante l'equazione di Scherrer dal picco 020 è risultata essere di 28 nm, valore minore rispetto a quello ottenuto dalla sintesi sol-gel I.

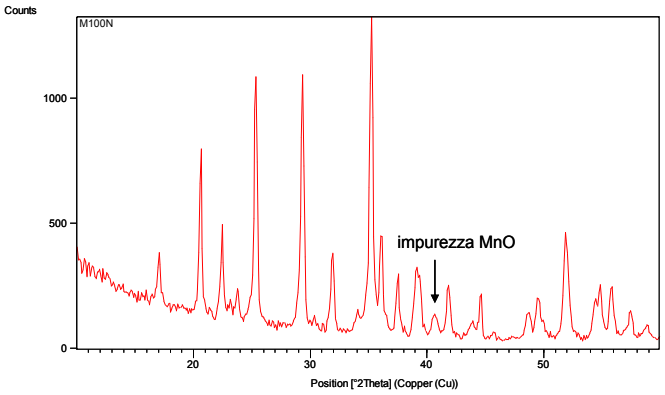


Figura 1. XRD di M100-II

La presenza del *coating* di carbone sul particolato dei materiali sintetizzati è stata ben evidenziata dall'analisi HRTEM con abbinato sistema di analisi X-EDS , come mostrato in Figura 2.

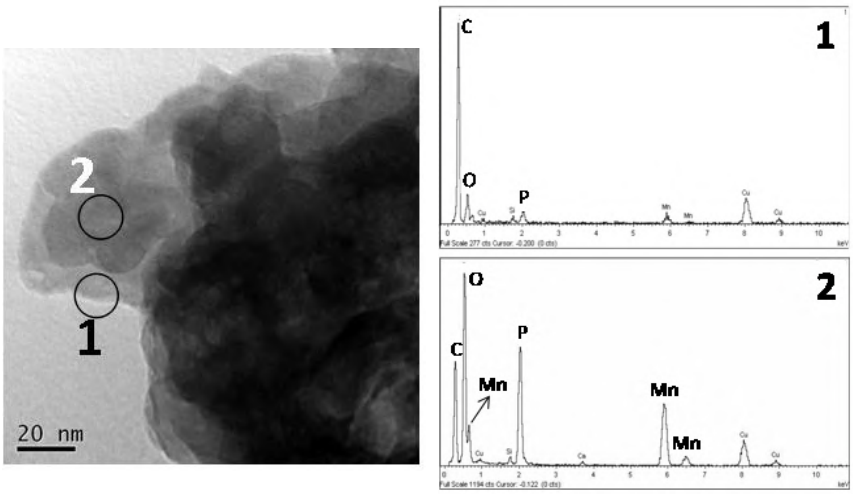


Figura 2. HRTEM di M100-II e X-EDS delle due zone evidenziate

Il contenuto di carbone di ricoprimento del $LiMnPO_4$/C (M100-II) è stato valutato mediante TGA riscaldando il campione in flusso di O_2 da temperatura ambiente fino a 700 °C ed è stato di ca.14%.

Elettrodi circolari (0,64 cm^2) venivano punzonati da stese su alluminio di materiale composito avente la seguente formulazione: 85%wt $LiMnPO_4$/C (M100-II), 10%wt C SuperP, 5%wt PVDF (polivinilenfluoruro) Kynar HSV 900; pertanto, tenendo conto del carbone di ricoprimento, il contenuto di materiale attivo nel composito era 73,1%wt.

La Figura 3, che mostra il profilo di potenziale del 2° e 3° ciclo di carica/scarica (carica CC C/10-CV C/30 e scarica CC C/10) con cut-off di potenziale 2,5 e 4,6 V, in EC-DMC- $LiPF_6$ 1M (LP30) a 50 °C, della cella vs. Li assemblata con l'elettrodo Q3 (2,80 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$) e la capacità specifica di scarica a diverso numero di cicli (capacità di scarica a 0,1C di 125 mAh/g a 50°C al 1° ciclo).

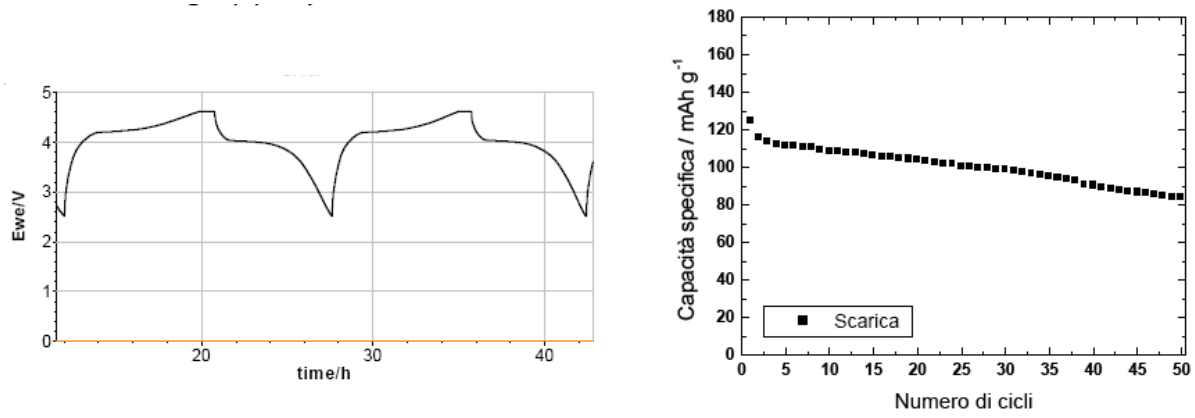


Figura 3. Profili di potenziale del 2° e 3° ciclo di carica/scarica in LP30 a 50 °C della cella *vs.* Li con elettrodo Q3 e capacità specifica a diverso numero di cicli

La Figura 4 riporta i risultati dei test condotti a 50 °C in LP30 su un elettrodo a base di M100-II per valutare la sua capacità di scarica (Figura 4a) e di carica (Figura 4b). L'elettrodo XN8 (3,53 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$) era completamente caricato mediante cariche a CC (0,1 C fino a 4,6 V)/CV (0,05C) e scaricato a varie C-rate da 0,1 a 2C, a 50 °C fino a 2,5 V per la valutazione della sua capacità di scarica, mentre per la valutazione della capacità di carica, condotta in sequenza sulla stessa cella, l'elettrodo era caricato fino a 4,6 V a varie C-rate da 0,1 C a 2 C e scaricato sempre a 0,1 C fino a 2,5 V.

Questi risultati mostrano le buone prestazioni degli elettrodi a base di $LiMnPO_4$ prodotto per sintesi sol gel da precursori completamente solubili ed evidenziano il notevole miglioramento ottenuto con la nuova procedura di sintesi (sol-gel II). Infatti, le prestazioni sono ben confrontabili con quelle degli elettrodi a base di $LiMn_{0,8}Fe_{0,2}PO_4$ (MF8020-I) ottenuti dopo ottimizzazione della sintesi sol-gel I, come si può vedere dalle Figure 5 e 6 che mostrano, rispettivamente, il profilo di potenziale di scarica a 0,1 C dell'elettrodo XN8 a base di M100-II sovrapposto a quello dell'elettrodo J12 a base di MF8020-I (5,08 mg cm^{-2} di $LiMn_{0,8}Fe_{0,2}PO_4$) e la valutazione della capacità di scarica dell'elettrodo J12. L'elettrodo J12 era caricato e scaricato nello stesso elettrolita alla stessa temperatura e condizioni dell'elettrodo XN8 ad esclusione del potenziale di fine carica, 4,4 V vs. Li invece di 4,6 V, e potenziale di fine scarica, 2,3 V invece di 2,5 V.

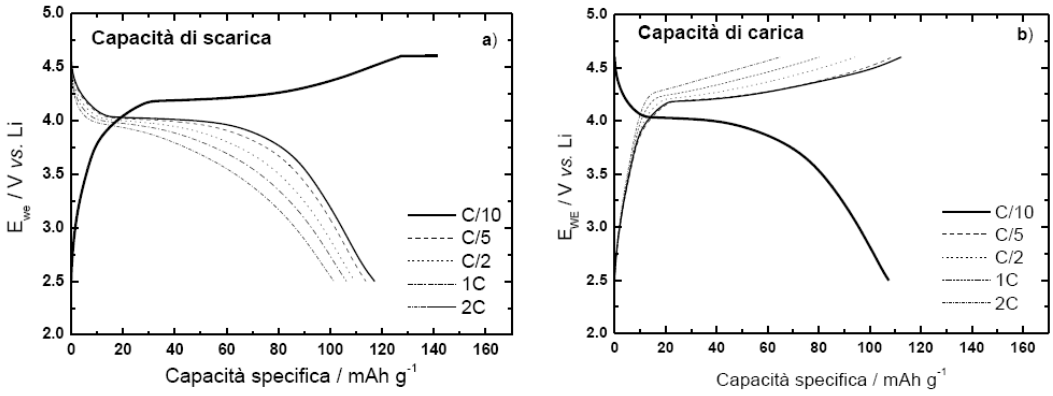


Figura 4. Capacità di scarica (a) e capacità di carica (b) dell'elettrodo XN8, a varie C-rate, in LP30 a 50 °C

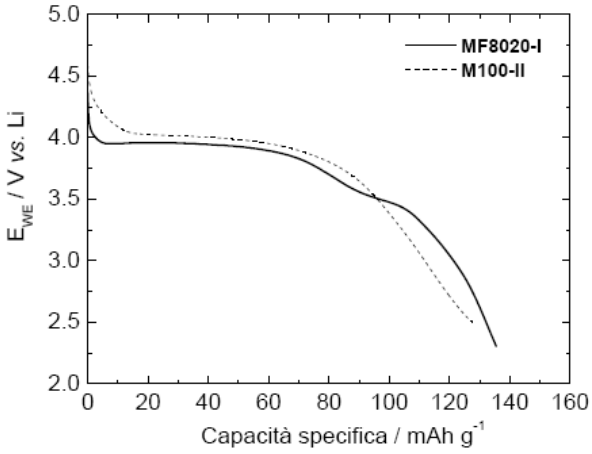


Figura 5. Profili di potenziale di scarica a 0,1C in LP30 a 50 °C degli elettrodi XN8 e J12, caricati completamente a CC(0,1 C)/CV(0,05 C)

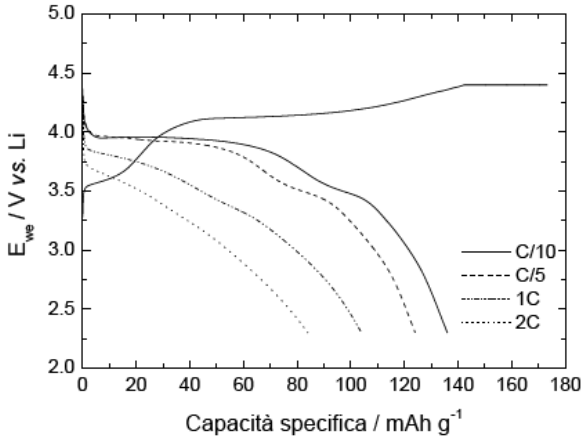


Figura 6. Capacità di scarica dell'elettrodo J12 (MF8020-I), a varie C-rate, in LP30 a 50 °C

Presso l''Università di Roma [Report RdS/2012/234] sono proseguite le attività riguardanti la sintesi di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$, utilizzando la procedura usata nella precedente annualità per preparare $LiFePO_4$, che consiste nella sintesi del fosfato di litio, manganese e ferro cristallino nanostrutturato contenente intrinsecamente carbone. La nuova via sintetica proposta si basa sulla reazione ad alta temperatura, di fenilfosfonato di ferro (II) e del fenilfosfonato di manganese (II) con carbonato di litio e doveva portare alla formulazione dell'$LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ con $0,1 < x < 1$ cioè ($LiMn_{0.1}Fe_{0.9}PO_4$, $LiMn_{0.5}Fe_{0.5}PO_4$, $LiMn_{0.9}Fe_{0.1}PO_4$, $LiMn_{0.95}Fe_{0.05}PO_4$ e $LiMnPO_4$).

Innanzitutto è stata effettuata la sintesi dei precursori e cioè il fenilfosfonato di ferro (II) e manganese (II) a partire dall'acido fenilfosfonico e i solfati di Fe e di Mn in proporzione per la formulazione desiderata secondo la reazione:

$$(1\text{-}x)FeSO_4{*}7\ H_2O + x\ MnSO_4{*}H_2O + H_2O_3PC_6H_5 + NH_2CONH_2 \rightarrow Fe_{1-x}Mn_x(C_6H_5PO_3){*}H_2O$$

con x = 0,1; 0,2; 0,3; ecc..

Le polveri microcristalline sottoposte ad analisi elementare, hanno dato risultati che confermano la struttura dei fenilfosfonati drogati attesi.

I precursori ibridi organici-inorganici, sono stati sottoposti all'analisi diffrattometrica, e i risultati sono mostrati nella Tabella 1, in cui sono riportati i parametri di cella di ogni precursore e confrontati con quelli del fenilfosfonato di Fe e fenilfosfonato di Mn.

Dal parametro di cella *a* si evince che il suo aumento è concorde all'incremento di drogaggio di manganese che si è effettuato sul precursore ibrido.

Tabella 1. Parametri di cella di diversi fenilfosfonati

	a (Å)	b (Å)	c (Å)
$Fe(C_6H_5PO_3)*H_2O$	5,6528	14,4041	4,8827
$Fe_{0,9}Mn_{0,1}(C_6H_5PO_3)*H_2O$	5,6800	14,4106	4,9006
$Fe_{0,8}Mn_{0,2}(C_6H_5PO_3)*H_2O$	5,6957	14,4337	4,9093
$Fe_{0,7}Mn_{0,3}(C_6H_5PO_3)*H_2O$	5,7073	14,3990	4,9236
$Mn(C_6H_5PO_3)*H_2O$	5,7514	14,3911	4,9535

Inoltre dall'analisi dei raggi X dei campioni risulta che l'unica fase cristallina presente nella polvere analizzata è corrispondente al fenilfosfonato aspettato. Dall'analisi Rietveld eseguita sul diffrattogramma di questi campioni si è rilevata la presenza di un'unica fase cristallografica ortorombica con il gruppo spaziale $Pmn2_1$. I precursori così ottenuti sono stati mescolati accuratamente con il carbonato di litio, e la polvere così ottenuta è stata sottoposta a TGA per stabilire quale fosse la temperatura da utilizzare per la calcinazione.

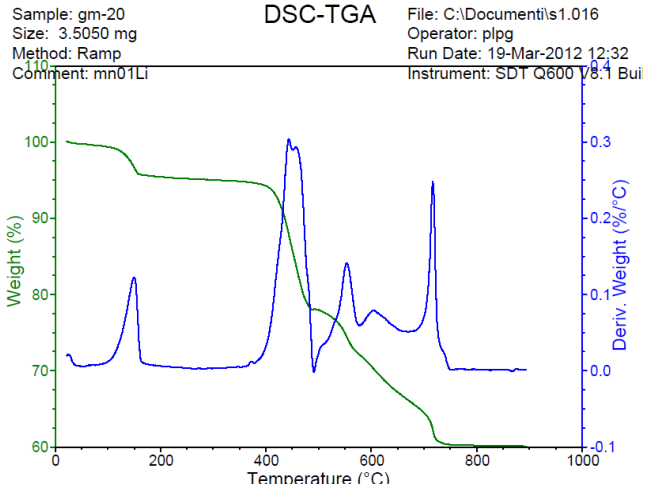


Figura 7. TGA della miscela $Fe_{0.9}Mn_{0.1}(C_6H_5PO_3)*H_2O$ e Li_2CO_3

Dall'analisi della TGA (Figura 7) sembra che il processo di calcinazione si concluda a 750 °C. Sulla base di questa analisi, la miscela costituita dai precursori ed Li_2CO_3 sono stati messi in muffola in atmosfera controllata a diverse temperature, 700, 750 e 850 °C per 16 ore. La calcinazione è stata condotta in un unico trattamento o in due trattamenti intervallati da un rimescolamento della polvere, in questo secondo caso i tempi di calcinazione sono stati raddoppiati. Le prime prove hanno riguardato $LiFe_{0,9}Mn_{0,1}PO_4$.

Si è esplorato il comportamento elettrochimico di questo unico drogaggio al variare della temperatura di calcinazione (700 °C – 750 °C – 850 °C) e al variare della composizione dell'elettrodo. Una volta scelta la temperatura migliore, si sarebbe preparato il materiale catodico a diversa composizione ($LiFe_{0,8}Mn_{0,2}PO_4$, $LiFe_{0,7}Mn_{0,3}PO_4$), per poi farlo ciclare con la composizione catodica migliore.

Osservando i risultati ottenuti dai raggi X (in Figura 8 è riportato un esempio), cioè confrontando i valori dei parametri di cella con quelli dell'$LiFePO_4$ si può affermare che il volume della cella unitaria dell'$LiMn_{0,1}Fe_{0,9}PO_4$ è maggiore di quella dell'$LiFePO_4$. Questo risultato dimostra il miglioramento ottenuto e ha consentito di passare alla caratterizzazione in cella con anodo di litio (Obiettivo C).

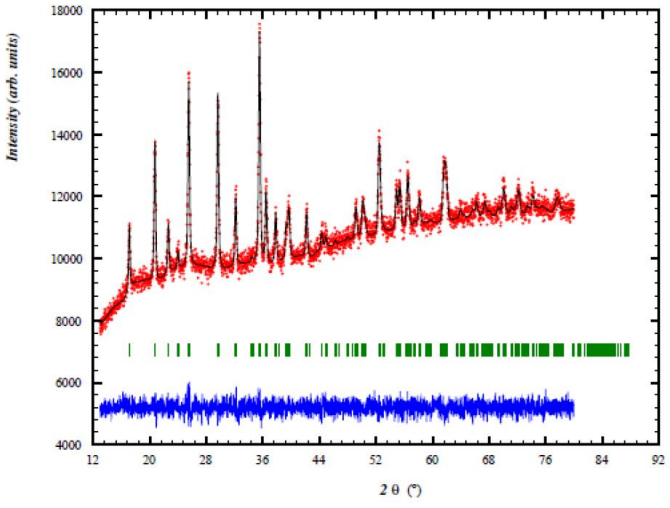


Figura 8. Spettro del campione Gm32A ($LiMn_{0,1}Fe_{0.9}PO_4$) che ha subìto due trattamenti termici

L'ENEA ha preparato numerosi campioni di $LiFePO_4$, cercando di sviluppare un processo più semplice ed economico di quelli noti dalla letteratura, pur mantenendo le caratteristiche tecniche peculiari del materiale. Infatti l'$LiFePO_4$ soddisfa molti dei requisisti necessari per far sì che esso possa essere usato come materiale catodico innovativo in batterie litio-ione. È poco costoso, non tossico, compatibile con l'ambiente e presenta valori di densità di energia teorici superiori o dello stesso ordine di grandezza, di materiali usati in batterie commerciali. La Figura 9 riporta una comparazione di tali valori. Il $LiFePO_4$ presenta una densità energetica gravimetrica inferiore solo all'ossido di nichel litiato, mentre la densità energetica volumetrica risulta migliore di quella del manganito di litio.

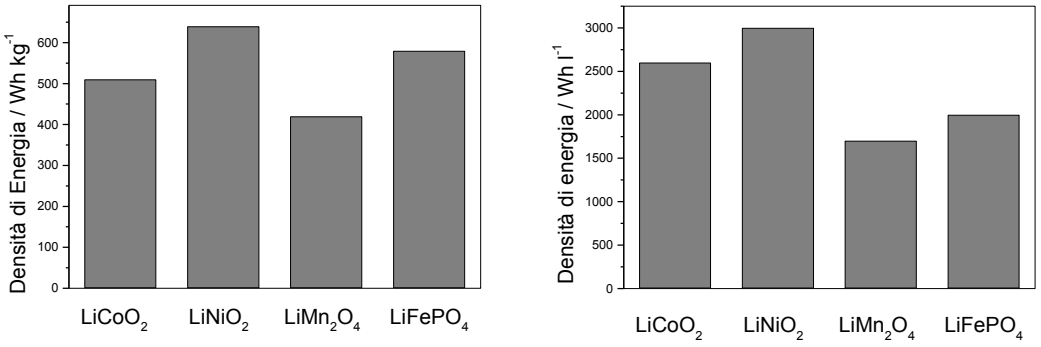


Figura 9. Densità di energia gravimetrica e volumetrica di differenti materiali catodici utilizzati in batterie al litio

Come fonte di ferro è stato utilizzato il solfato ferroso eptaidrato. Sono state effettuate cinque differenti preparazioni che prevedevano:

1. la sintesi diretta a partire da ferro solfato eptaidrato;
2. la sintesi diretta a partire da ferro solfato eptaidrato e solfuro di litio;
3. la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $(NH_4)FePO_4$ (FAP);
4. la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $LiFePO_4$;
5. la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $FeCO_3$.

Alla base della preparazione per sintesi diretta a partire da ferro solfato eptaidrato vi è l'evidenza che il solfato di ferro scaldato ad oltre 600 °C si decompone secondo l'equazione:

$$FeSO_4*7\ H_2O \longrightarrow FeO + SO_2 + 7\ H_2O + ½\ O_2$$

Sfruttando questa reazione si è immaginato di poter preparare il $LiFePO_4$ tramite la seguente via sintetica:

$$FeSO_4*7\ H_2O + (NH_4)H_2PO_4 + LiOH*H_2O \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + SO_2 + 10\ H_2O + ½\ O_2$$

Nel caso della sintesi diretta a partire da ferro solfato eptaidrato e solfuro di litio, si è partiti dalla supposizione che il solfuro potesse reagire con il solfato secondo la seguente proporzione:

$$S^{2-} + SO_4^{2-} \longrightarrow 2\ SO_2 + 4e^-$$

Il solfuro è stato inoltre usato come fonte di ioni litio. Il rimanente apporto di litio è stato fornito come litio idrossido. Il $LiFePO_4$ è stato sintetizzato secondo il seguente schema di reazione:

$$0{,}33\ LiOH*H_2O + 0{,}33\ Li_2S + (NH_4)H_2PO_4 + FeSO_4*7\ H_2O \longrightarrow LiFePO_4 + 1{,}33\ SO_2 + 9\ H_2O + NH_3$$

Per la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $(NH_4)FePO_4$ è stata utilizzata la precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico secondo il seguente equilibrio:

$$FeSO_4 + (NH_4)_xH_{(3-x)}PO_4 \longrightarrow NH_4FePO_4 + (NH_4)_{(1-x)}H_{(3-x)}SO_4$$

Il $LiFePO_4$ è stato poi preparato per reazione allo stato solido del ferro ammonio fosfato con idruro di litio:

$$NH_4FePO_4 + LiOH*H_2O \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 2\ H_2O$$

Per la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $LiFePO_4$ si è sfruttata l'insolubilità di quest'ultimo che è stato precipitato secondo il seguente schema di reazione:

$$FeSO_4*7\ H_2O + Li_3PO_4 \longrightarrow LiFePO_4\ (amorfo) + Li_2SO_4 + 7\ H_2O$$

Per la sintesi a due step a partire da ferro solfato eptaidrato tramite precipitazione del $FeCO_3$ si è utilizzato il carbonato si sodio come agente precipitante secondo il seguente schema di reazione:

$$FeSO_4*7\ H_2O + Na_2CO_3 \longrightarrow FeCO_3 + Na_2SO_4 + 7\ H_2O$$

Il $LiFePO_4$ è stato poi preparato per reazione allo stato solido del ferro carbonato con idruro di litio e fosfato di ammonio:

$$FeCO_3 + LiOH*H_2O + (NH_4)H_2PO_4 \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 3\ H_2O + CO_2$$

I prodotti intermedi sono stati quindi trattati termicamente per trasformarli in $LiFePO_4$ cristallino. Il trattamento termico è stato effettuato a 600 °C per 2 ore. I materiali così ottenuti sono stati analizzati ai raggi X per individuare il loro abito cristallino e trasformati in elettrodi per valutare le loro prestazioni elettrochimiche.

La preparazione del $LiFePO_4$ a partire dal FAP si è rivelata la più promettente in quanto ha prodotto materiali capaci di ciclare reversibilmente a basso rate di scarica fino a 100 mAh/g di capacità specifica. Il materiale presenta inoltre una buona reversibilità di capacità dopo prolungata ciclazione. Dopo 1000 cicli di carica e scarica veloci, il materiale era capace di ciclare reversibilmente circa il 70% della capacità iniziale. In virtù di tali risultati tale metodo è stato ulteriormente studiato al fine di aumentare la resa di prodotto e per cercare di migliorare le capacità elettrochimiche del materiale. In particolare sono state effettuate quattro sintesi del sale ammonico distinte in:

1. precipitazione in fase omogenea
2. precipitazione in fase eterogenea da fosfato sodico stechiometrico
3. precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico stechiometrico
4. precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico sopra stechiometrico

Per la precipitazione in fase omogenea è stata utilizzata come fonte di sali ammonici l'urea, che a temperatura di 80°C, decompone secondo la reazione:

$$NH_2CONH_2 + 2H_2O \longrightarrow 2\ NH_4^{+} + CO_3^{2-}$$

L'urea è stata aggiunta ad una soluzione di fosfato acido di sodio e solfato ferroso e la soluzione è stata scaldata a 90 °C per favorire la precipitazione del FAP:

$$FeSO_4 + Na_2HPO_4 + 0{,}5\ NH_2CONH_2 + H_2O \longrightarrow NH_4FePO_4 + Na_2SO_4 + 0{,}5\ CO_2)$$

Nella precipitazione in fase eterogenea da fosfato sodico stechiometrico ad una soluzione di fosfato acido di ammonio e solfato ferroso è stato aggiunto dell'idrossido di sodio come reattivo precipitante:

$$FeSO_4 + NH_4H_2PO_4 + 2\ NaOH \longrightarrow NH_4FePO_4 + Na_2SO_4$$

Nella precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico stechiometrico ad una soluzione di solfato ferroso è stata addizionata una quantità stechiometrica di fosfato di ammonio:

$$FeSO_4 + (NH_4)_3PO_4 \longrightarrow NH_4FePO_4 + (NH_4)_2SO_4$$

Infine nella precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico sopra stechiometrico, ad una soluzione di solfato ferroso è stata addizionata una quantità doppia di fosfato di ammonio:

$$FeSO_4 + 2\ (NH_4)_3PO_4 \longrightarrow NH_4FePO_4 + (NH_4)_2SO_4 + (NH_4)_3PO_4$$

I materiali sono stati caratterizzati tramite microscopia a scansione elettronica (SEM) accoppiata ad analisi di diffrazione dei raggi X secondari (EDS) per la caratterizzazione elementare [Report RdS/2012/237].

A titolo esemplificativo, la Figura 10 mostra i risultati di un'analisi ai raggi X delle polveri. Si nota la presenza dei picchi relativi al litio idrossido e la scomparsa dei picchi relativi agli altri prodotti di partenza.

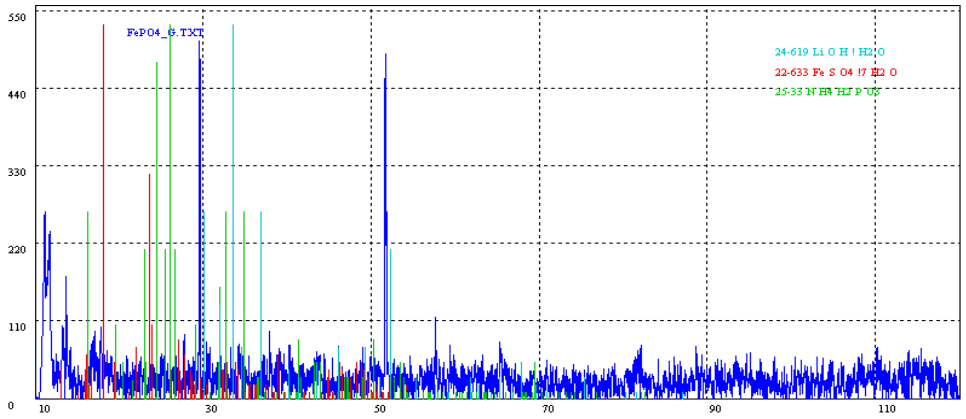


Figura 10. Diffrattogramma del materiale ottenuto per miscelazione a partire da solfato di ferro eptaidrato ammonio fosfato e litio idrossido

L'analisi EDS è stata effettuata sia su punti singoli che in aree tramite analisi in scansione. Gli elementi ricercati sono stati P, Fe e S. La spettroscopia a raggi X è stata utilizzata per valutare la cristallinità dei materiali. Il materiale ottenuto per precipitazione in fase omogenea ed il materiale ottenuto per precipitazione in fase eterogenea da fosfato di ammonio stechiometrico appaiono amorfi. Al contrario i materiali ottenuti per precipitazione in fase eterogenea da fosfato di ammonio sopra stechiometrico o da fosfato di sodio stechiometrico appaiono cristallini. I due picchi situati a 10,032° e 31,664° sono stati identificati appartenenti alla struttura cristallina del $NH_4FePO_4*H_2O$ (carta numero 45-0424). I sali d'ammonio preparati con differenti metodologie sono stati trattati termicamente in presenza di litio per trasformarli in $LiFePO_4$. Sono state valutate quattro variabili: temperatura di reazione, tempo di reazione, agente litiante e presenza di additivi.

In maniera del tutto generale l'$LiFePO_4$ è stato preparato secondo il seguente schema:

$$NH_4FePO_4 + LiOH*H_2O \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 2\ H_2O$$

Il litio idrossido monoidrato è stato macinato in mortaio. Quindi si aggiunge il FAP macinando dopo ogni aggiunta. La polvere è trasferita in un crogiuolo che è inserito all'interno di un tubo di quarzo. L'ossigeno all'interno del tubo è spostato facendo fluire una miscela azoto/idrogeno. Dopo qualche minuto si rallenta il flusso a 100 ml al minuto e si pone in forno preriscaldato. Quindi si raffredda velocemente e il solido è pesato per valutare la resa in $LiFePO_4$. Il trattamento termico è stato fatto normalmente a 600 °C per 2 ore mentre in due casi lo stesso è stato effettuato a due differenti temperature (550 e 700 °C) per differenti tempi (1 o 2 ore). La reazione è stata inoltre effettuata variando l'agente litiante ed utilizzando il litio carbonato ed il litio acetato (Li_2CO_3 e $LiCH_3COO$):

$$NH_4FePO_4 + 0.5Li_2CO_3 \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 0{,}5CO_2 + H_2O$$

$$NH_4FePO_4 + LiCH_3COO*2\ H_2O \longrightarrow LiFePO_4 + NH_4CH_3COO + 2\ H_2O$$

Inoltre è stato investigato l'effetto dell'aggiunta di polietilenglicole (PEG 1000 MW= 1000) come agente disperdente ed antiagglomerante e del polistirene (PS). Il PS si carbonizza durante il trattamento termico.

$$NH_4FePO_4 + LiOH*H_2O + PEG \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 2\ H_2O + CO$$

$$NH_4FePO_4 + LiOH*H_2O + PS \longrightarrow LiFePO_4 + NH_3 + 2\ H_2O + C$$

Tutti i materiali prodotti sono stati morfologicamente caratterizzati tramite microscopia a scansione elettronica (SEM) accoppiata ad analisi di diffrazione dei raggi X secondari (EDS) per la caratterizzazione elementare utilizzando un microscopio JEOL, JSM-5510LV e un sistema IXRF EDS-2000. Per ogni campione è stata effettuata una misura a basso (X50), medio (X200) ed alto (X500) ingrandimento. L'analisi EDS è stata effettuata sia su punti singoli che in aree tramite analisi in scansione. Gli elementi ricercati sono stati P, Fe e S [Report RdS/2012/238 e 239].

Micrografie a maggior ingrandimento (fino a X10.000) sono state fatte sui campioni migliori, come mostrato in Figura 11: la superficie della piastrella risulta estremamente regolare e costituta da particelle di dimensione omogenea pari a 20 micron.

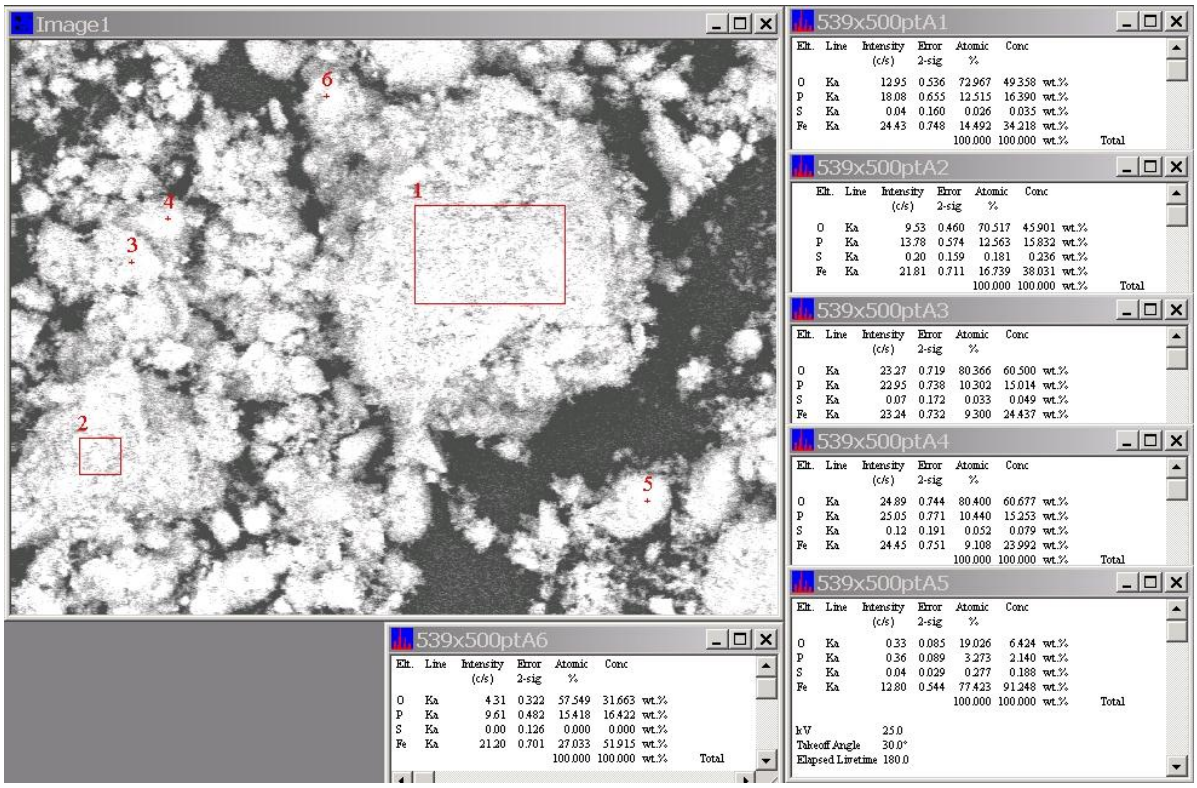


Figura 11. Microfotografia effettuata a 500 ingrandimenti sul campione preparato per precipitazione in fase omogenea. I punti si riferiscono alle zone sulle quali è stata effettuata la determinazione elementare tramite EDS

La mostra la mappa EDS presa su grani singoli (punti 3, 4, 5 e 6) e due scansioni effettuate su varie porzioni (quadrati 1 e 2). Il campione risulta molto disomogeneo e due punti (5 e 6) sono talmente fuori dai valori tipici per cui sono stati omessi nei calcoli. In tal modo la media ferro/fosforo risulta essere 0,98.

B. Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali anodici con prestazioni migliorate

L'attività, analogamente con quanto previsto con l'Obiettivo A, è stata focalizzata sulla ricerca di materiali anodici per celle al litio particolarmente adatti per le applicazioni nelle reti elettriche, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni degli anodi prodotti mantenendo basso il costo e l'impatto ambientale. I materiali selezionati (principalmente grafiti, carboni amorfi e/o parzialmente grafitati e composti a base di ossido di titanio) durante la precedente annualità sono stati ulteriormente sviluppati ed ottimizzati, in base ai risultati sperimentali ottenuti in celle complete da laboratorio (Obiettivo C) e prodotti in scala utile per la realizzazione di altre celle da laboratorio per l'esecuzione delle verifiche finali ed eventuale scale up in celle di dimensioni superiori. Inoltre è stata svolta un'attività esplorativa su materiali anodici di ultima generazione, quali quelli a base di grafene e di metalli capaci di formare leghe (Sn, Si, SnSi, Sb e intermetallici). I nastri anodici sono stati preparati sia da ENEA che da altri partecipanti utilizzando i materiali attivi selezionati. Gli anodi sono stati assemblati secondo uno schema standard, costituito dal materiale attivo, un conduttore elettronico (carbone) ed un opportuno legante polimerico, che ha anche incluso l'uso, in alternativa ai materiali convenzionali, di liquidi ionici. Tutti i materiali acquisiti e/o prodotti, sono stati poi caratterizzati in laboratorio con analisi chimiche, fisiche ed elettrochimiche. Inoltre con i materiali più interessanti sono stati costruiti elettrodi anodici successivamente caratterizzati in celle di riferimento (Obiettivo C). Le caratterizzazioni elettrochimiche hanno seguito le procedure concordate nel Gruppo di Coordinamento CNR-ENEA-RSE.

Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Camerino e l'Università di Roma "La Sapienza".

L'Università di Camerino [Report RdS/2012/236] si è concentrata sulla preparazione e la caratterizzazione di anodi per batterie litio-ione costituiti da compositi M/grafene con Sn, Si ed Sb. Tutti questi elementi sono capaci di formare leghe con il litio secondo la reazione:

$$x\,Li^{+} + x\,e^{-} + M \Leftrightarrow Li_xM$$

dove x può assumere valori pari a 4,4 per Sn e Si e 3 per Sb con capacità teoriche pari a 993, 4200 e 660 mAh/g. La formazione delle leghe durante la carica e la loro successiva ridissoluzione sono accompagnate da elevate variazioni di volume (fino al 300%), che inducono stress meccanici negli elettrodi determinando polverizzazione e conseguente rapida perdita di capacità. In letteratura sono reperibili numerosissimi lavori in cui le particelle metalliche sono supportate su matrici di varia natura, generalmente a base di carbone, capaci di compensare le variazioni di volume (effetto tampone) e quindi di incrementare la stabilità meccanica degli elettrodi. Su questa linea la letteratura recente riporta diversi tentativi di utilizzare grafene come supporto per la costruzione di anodi tipo lega per batterie al litio. Il grafene è generalmente preparato per ossidazione della grafite in condizioni molto drastiche (H_2SO_4, HNO_3, H_2O_2, H_3PO_4). L'ossidazione produce il così detto ossido di grafite (GO) molto ricco di gruppi contenenti ossigeno che possono essere funzionalizzati in vario modo per reazione con sali metallici. Anche se al momento non si conosce esattamente la struttura del GO, è assodato che gruppi carbonilici sono prevalentemente localizzati sugli edge mentre ossidrili, gruppi epossidici sono essenzialmente legati sui piani basali. Il trattamento termico in atmosfera riducente o la riduzione chimica provocano l'esfoliazione del GO, producendo grafene (reduced graphene oxide, RGO). Quando l'esfoliazione è effettuata in presenza di sali contenenti ioni metallici la reazione produce particelle metalliche o ossidi metallici di dimensioni nanometriche uniformemente disperse in una matrice carboniosa che possono essere utilizzati per la costruzione di elettrodi. Nel caso di particelle metalliche od ossidi di metalli capaci di formare leghe con forti variazioni di volume, la matrice carboniosa, costituita da aggregati di più layers di grafene sovrapposti e disposti in maniera random, funziona da tampone per accomodare gli stress meccanici. Oltre che per reazione con ioni metallici il GO può essere funzionalizzato con polimeri che si inseriscono fra i layer impedendo la loro aggregazione. La successiva reazione con ioni metallici seguita da calcinazione determina decomposizione del polimero a carbone e la formazione di strutture a sandwich, dove layers grafenici intrappolano particelle nanometriche di metalli o ossidi (es. SnO_2) utilizzabili per la formazione di elettrodi.

In questo quadro la ricerca condotta ha riguardato i seguenti aspetti:

1. messa a punto della preparazione di GO e grafene ossido ridotto (RGO) e sua caratterizzazione;
2. preparazione di compositi M/RGO con M = Sn, Si ed Sb, esfoliazione/riduzione;
3. caratterizzazione elettrochimica.

L'Università di Roma [Report RdS/2012/234] ha proseguito la messa a punto di una tecnica elettrochimica di produzione di nanotubi di TiO_2 mediante l'ossidazione del Ti in bagni di anodizzazione con fluoruri, seguita da un trattamento termico di cristallizzazione. Prove elettrochimiche di ciclazione galvanostatiche in celle con anodo di litio, di campioni di TiO_2 prodotti con questo metodo hanno dato risultati molto interessanti. La mancata determinazione della quantità di materiale attivo ottenuto con questa tecnica aveva consentito di valutare le prestazioni del TiO_2 solo attraverso la densità di corrente (mA/cm^2) che riusciva a sopportare e la ciclabilità.

La produzione di grosse quantità di TiO_2 nanostrutturato in modo da poterlo rendere asportabile dal supporto di titanio metallico, dove viene ottenuto, è stato il primo obiettivo perseguito. Lo scopo ovviamente era di poter utilizzare le tecniche convenzionali di preparazione degli elettrodi, cioè mediante la formazione di "slurry" di materiale attivo con carbon black e legante, per poi poterlo facilmente supportare sul connettore elettrico. La determinazione della quantità di ossido nanostrutturato che si ottiene al variare delle condizioni operative del processo di anodizzazione ha dato l'idea dello spessore di Ti metallico che viene convertito in ossido. Questo risultato ha stimolato la ricerca per produrre i nanotubi di TiO_2 direttamente su un nastro di rame ricoperto di Ti il cui spessore sarà ottimizzato per ottenere la giusta carica dell'elettrodo. L'obiettivo è stato quello di ottenere un nastro anodico da utilizzare direttamente nel processo di assemblaggio delle batterie.

Un altro materiale interessante, a base di ossidi di titanio, è $Li_4Ti_5O_{12}$. Sono stati scelti precursori metallo-organici contenenti titanio (IV), come l'ossalato di titanile e litio acetato oppure usati dei carbossilati di titanio e litio in modo da produrre per decomposizione termica $Li_4Ti_5O_{12}$, monofasico e nanostrutturato. Tali precursori a base di carbonio potrebbero essere in grado di lasciare un residuo carbonioso durante la calcinazione, la cui presenza potrebbe aumentare la conducibilità elettronica dell'ossido di titanio, che di per se non è un buon conduttore elettronico. L'aumento della conduttività elettronica di $Li_4Ti_5O_{12}$ può determinare un incremento sensibile delle prestazioni elettrochimiche come anodo in celle agli ioni Li [$LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ (come catodo) / $Li_4Ti_5O_{12}$ (come anodo)] tanto da poter essere il punto di forza per una reale commercializzazione. E' noto infatti, che più brevi lunghezze di diffusione degli ioni Li^+ e l'aumento del trasporto elettronico nelle nanoparticelle migliorano le prestazioni degli elettrodi a vantaggio soprattutto della possibilità di essere utilizzati in batterie litio-ioni di potenza.

La caratterizzazione elettrochimica degli elettrodi è stata fatta mediante le usuali tecniche elettrochimiche: ciclazioni galvanostatiche e mediante voltammetrie cicliche o spettroscopia di potenziale. Le prove di stabilitàdegli

elettrodi a base di TiO_2 sono state eseguite mediante ciclazioni prolungate su celle con anodo di litio seguendo un protocollo concordato con ENEA.

L'attività ENEA ha riguardato la ricerca di vari materiali anodici per celle al litio particolarmente adatte per le applicazioni nelle reti elettriche, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni degli anodi prodotti mantenendo basso il costo e l'impatto ambientale. Tra i materiali selezionati figura l'ossido di titanio scelto per la sua elevata capacità (175 mAh/g), stabile tensione di cella durante quasi tutta la durata della scarica, ottima ciclabilità, basso costo ed impatto ambientale. Nel precedente anno di attività sono stati sintetizzati per via elettrochimica nanotubi di TiO_2 ottenuti (per accrescimento) su un substrato di titanio (mediante ossidazione del titanio metallico). Test elettrochimici hanno mostrato prestazioni piuttosto promettenti e, pertanto, è stato deciso di proseguire la ricerca su tali materiali.

Tuttavia, l'esiguo deposito di TiO_2 (su substrato di titanio) ha reso difficoltosa la determinazione esatta della capacità degli elettrodi preparati, stimata comunque insufficiente per applicazioni in batteria. Inoltre, un substrato costituito da un materiale semiconduttore quale titanio non risulta particolarmente adatto quale collettore anodico in celle (e batterie) al litio per via della sua modesta conduzione elettronica. Ne deriva, pertanto, la necessità di sintetizzare quantità più elevate di TiO_2 che possano, successivamente, essere rimosse dal substrato di titanio e quantificate. Lo scopo è quello di utilizzare TiO_2 ottenuto in tal modo come materiale attivo in anodi aventi capacità (per unità di area attiva) di interesse per applicazioni pratiche alla rete elettrica legante polimerico (Teflon, PTFE), sono stati preparati mediante miscelazione dei componenti e successiva pressatura. Tale procedura ha consentito di ottenere elettrodi omogenei (in spessore e composizione) aventi proprietà meccaniche molto buone ed adeguata porosità (al fine di garantire sufficiente penetrazione dell'elettrolita liquido).

Al fine di perseguire tali obiettivi sono state preparate, secondo diverse procedure e metodologie, differenti tipologie (strutturali) di TiO_2 con lo scopo di ottenere materiali solidi aventi granulometria nanometrica e controllata. Inoltre, le caratteristiche di tali materiali sono state comparate con quelle di TiO_2 acquisito da altri laboratori ENEA e/o commerciali. Tutti i materiali attivi TiO_2 sono stati caratterizzati in termini di morfologia e tipologia delle particelle e stabilità termica mediante SEM e TGA, rispettivamente [Report RdS/2012/241]. Gli anodi a base di TiO_2 sono stati successivamente caratterizzati, in semicelle (elettrochimiche) anodiche Li/elettrolita liquido/ Anodo in termini di capacità, cicli di vita ed efficienza coulombica a differenti regimi di corrente [Report RdS/2012/242].

Infine è stata eseguita la caratterizzazione elettrochimica di anodi costituiti da nanotubi di ossido di titanio (TiO_2) ottenuti mediante ossidazione di un substrato in titanio. Gli anodi sono stati investigati in semicelle anodiche Li/elettrolita liquido/Anodo in termini di capacità, cicli di vita ed efficienza coulombica a differenti regimi di corrente [Report RdS/2012/243].

Le attività svolte dall'Università di Camerino si sono indirizzate su:

- preparazione e caratterizzazione di GO
- preparazione di compositi M/RGO con M = Sn, Si ed Sb, esfoliazione e caratterizzazione fisica ed elettrochimica.

Per la sintesi del GO è stato utilizzato il metodo di Hummer modificato[1]. Grafite (Timcal KS15) è stata trattata con una miscela H_2SO_4/H_3PO_4 a caldo per diverse ore e successivamente con H_2O_2. Si ottiene in questo modo una soluzione colloidale di GO che è filtrata e sottoposta a diversi lavaggi con HCl e H_2O. Successivi trattamenti prevedono la dispersione in etanolo, coagulazione con dietil-etere, successiva estrazione del coagulato con etere di petrolio e procedura di essiccazione. Il GO si può però descrivere come un singolo o un insieme di layers costituiti da cicli aromatici contigui di carbonio interrotti da funzioni epossidiche, alcoliche, chetoniche, carboniliche e carbossiliche (Figura 12). Questa particolare struttura/composizione fa sì che il GO sia un isolante a carattere idrofilo. Il GO, preparato da polveri di grafite, visto il carattere idrofilo, può essere facilmente disperso in acqua.

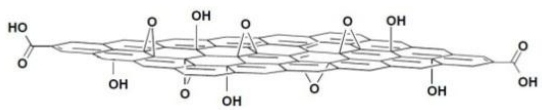


Figura 12. Singolo layer di GO

[1] D. C. Marcano, D. V. Kosynkin, J. M. Berlin, A. Sinitskii, Z. Sun, A. Slesarev, L. B. Alemany, W. Lu, J. M. Tour, "Improved synthesis of graphene

Il prodotto è una polvere nera idrofila che è stata ridotta/esfoliata tramite trattamento per un minuto in forno a microonde a 900 W. Durante il trattamento in forno a microonde il GO si espande violentemente, a causa della eliminazione di ossigeno ed acqua, producendo scintille e fumo. Il prodotto finale espanso si presenta come una polvere nera volatile idrofoba che appare al microscopio elettronico a scansione come una struttura molto porosa. La formazione di GO è ben evidenziata negli spettri a raggi X che sono caratterizzati dalla scomparsa del picco 002 a 24,5° della grafite ed il suo spostamento ad angoli più bassi. Lo spostamento del picco indica un'espansione della distanza fra i layers e può essere correlato al grado di ossidazione. La successiva esfoliazione ripristina, almeno parzialmente, il picco della grafite che si presenta molto allargato a causa della disposizione random degli strati di grafene.

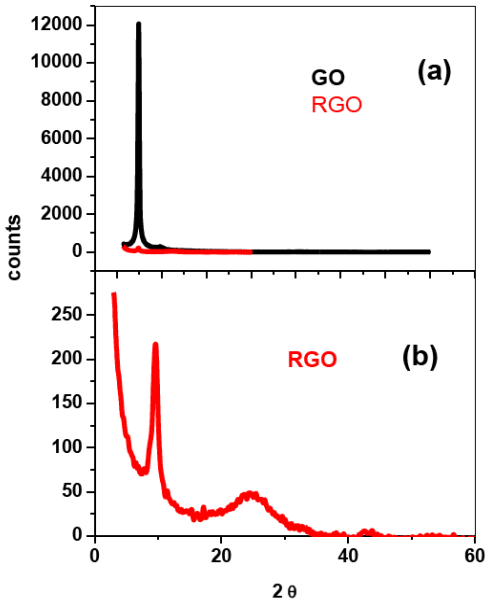


Figura 13. Spettri di diffrazione di GO (a) e RGO

Nel pattern di diffrazione del GO (Figura 13a) è chiaramente visibile il picco a 9,84° relativo al piano (002) del GO che corrisponde a una distanza tra i layer di grafene di circa 8,98 Å. Per effetto dell'ossidazione la distanza tra i layer di grafene nella grafite aumenta passando da 3,35 Å a 8,98 Å. È evidente quindi che la struttura ha subito una consistente modifica. Nello stesso panel la linea rossa rappresenta lo spettro ottenuto nelle stesse condizioni di RGO. Lo stesso spettro amplificato è riportato in Figura 13b. Come si può osservare il picco a 9,84°, caratteristico del GO, diminuisce notevolmente nello spettro di RGO mentre compare una banda a 24,5° nella zona di frequenza caratteristica della grafite. Questo significa che il GO non è stato completamente esfoliato in fogli di grafene: i.e. la struttura è ancora parzialmente ossidata. La banda della grafite è molto ampia, a dimostrazione del fatto che ora i layer sono orientati in maniera random.

Gli spettri UV-Vis, FTIR confermano i dati ottenuti tramite raggi X. Immagini al microscopio elettronico a trasmissione evidenziano la presenza della struttura bidimensionale sia di GO che di RGO (Figura 14). La morfologia dei composti è stata investigata tramite microscopia elettronica a scansione utilizzando un microscopio Cambridge Stereoscan 360 e tramite microscopia elettronica a trasmissione (TEM) con un microscopio JEOL 1010.

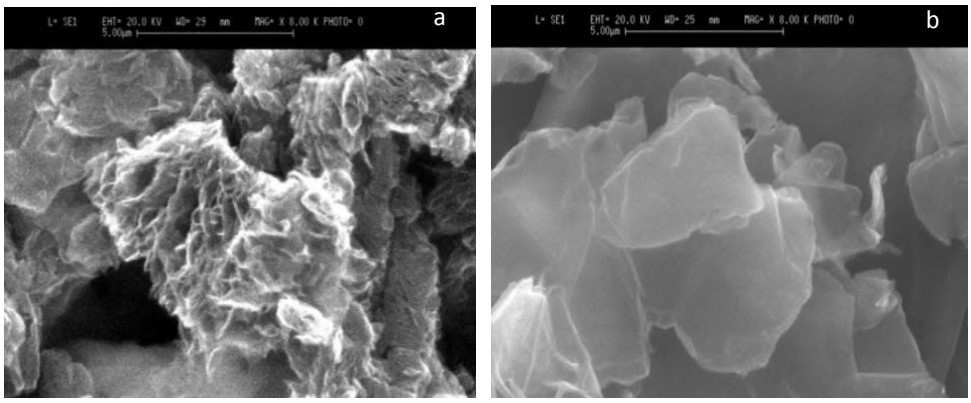


Figura 14. Immagine SEM (8000X) di GO (a) e RGO (b)

La caratterizzazione elettrochimica dell'RGO preparato è stata effettuata in celle a T a tre elettrodi, utilizzando litio metallico come riferimento e controelettrodo ed una miscela EC:DMC 1:1 1M in Li PF6. L'elettrodo avente RGO come componente attivo è stato preparato con tecnica "doctor blade" a partire da uno slurry con composizione 80:10:10 in RGO:PVDF: Super-P [Report RdS/2012/234].

La capacità al primo ciclo è pari a 1250 mAh/g con un'efficienza coulombica del 55%. Nei cicli successivi condotti a velocita di carica/scarica da 80 a 800 mAh/g, la capacità reversibile decade abbastanza rapidamente da valori dell'ordine di 600 mAh/g a circa 372 mAh/g dopo 50 cicli. Calcoli teorici supportati da dati sperimentali prevedono una capacità teorica per il grafene pari al doppio di quella della grafite, perché il litio può intercalare su ambedue i lati (LiC_3). Da qui si deduce che i nostri elettrodi non sono stabili e che evolvono a grafite.

La procedura seguita per la preparazione dei materiali attivi M/RGO, salvo variazioni particolari, è stata la seguente:

- SnO_2/RGO. GO è stato disperso per sonificazione in glicole etilenico fino a ottenere una sospensione omogenea. Alla sospensione è stata aggiunta lentamente una soluzione alcolica di composto di stagno ($SnCl_2$ o $(C_6H_5)_2SnCl_2$) sotto agitazione. La miscela di reazione è stata poi trattata in un forno a microonde e irradiata per esfoliare/ridurre il GO. Il solido nero ottenuto è stato filtrato, lavato con etanolo e seccato a 50 °C e trattato a 500 °C in forno per due ore in atmosfera Ar-H_2 (95-5%) per favorire ulteriore riduzione del GO. Il prodotto finale è un composito costituito da SnO_2/RGO, come evidenziato dallo spettro di diffrazione. In una seconda preparazione il GO è stato prima funzionalizzato con acido poliacrilico (PAA) mediante reazione di una sospensione di GO con una soluzione di PAA in glicole etilenico. Alla miscela di reazione è stata aggiunta una soluzione di $(C_6H_5)_2SnCl_2$ e, come in precedenza, il tutto è stato sottoposto alla procedura descritta in precedenza. Il materiale è identificato come SnO_2/RGO/ PAA.
- SbOx/RGO. La preparazione è la stessa seguita per Sn/RGO senza funzionalizzazione con PAA. Dai raggi-X si deduce che il materiale attivo è una miscela di ossidi di antimonio.
- Si/RGO. La preparazione è stata eseguita come nel caso dello Sn/RGO senza funzionalizzazione con PAA utilizzando come fonte di Si l'organometallico $(CH_3CO_2)_4Si$ (Si/RGO1) oppure mediante dispersione di silicio nanometrico, precedentemente ossidato superficialmente, in una dispersione acquosa di GO (Si/RGO2). Il prodotto solido filtrato è stato poi ridotto/esfoliato in forno a 500 °C in atmosfera riducente (H_2-Ar 5-95%).

Nel precedente anno di attività, l'Università di Roma ha definito una tecnica elettrochimica di produzione di nanotubi di TiO_2 mediante l'ossidazione del Ti (titanio) in bagni di anodizzazione con fluoruri, seguita da un trattamento termico di cristallizzazione che hanno mostrato interessanti proprietà elettrochimiche. In questa annualità l'attività si è concentrata sulla valutazione delle quantità di TiO_2 ottenute con questa tecnica e soprattutto sull'ottenimento di quantità significative che potessero consentire la preparazione di catodi con la tecnica della deposizione di uno slurry su supporto di Al.

Le fasi della sintesi sviluppate sono state le seguenti:

- *Pre-trattamento:* le lastrine di Ti vengono sottoposte ad un processo di lavaggio e decapaggio. Il lavaggio viene fatto con acqua e sapone assistito da ultrasuoni, le lastrine sono poi risciacquate in etanolo puro e asciugate sotto un flusso di azoto. Il decapaggio consiste nel trattamento con una soluzione di HF/HNO_3 in rapporto volumetrico di 1:3 e diluita 1:10 con acqua distillata, al fine di eliminare lo strato di ossido superficiale e le varie impurezze presenti.

- *Pre-anodizzazione:* i campioni sono stati sottoposti ad un trattamento di pre-anodizzazione in modo tale da ottenere uno strato di ossido superficiale uniforme. A tale scopo, dopo il pretrattamento, la lastrina di titanio viene inserita in una cella a tre elettrodi (il Ti è l'anodo, il contro elettrodo è costituito da una lamina di Pt, mentre il riferimento è un elettrodo di calomelano standard SCE) contenente una soluzione di KOH 1M e sottoposto ad una elettrolisi galvanostatica usando una densità di corrente prefissata di 10 A/cm^2 per tre minuti,

- *Anodizzazione elettrochimica:* l'anodizzazione, e quindi la crescita dei nano-tubi di TiO_2, è stata effettuata utilizzando una soluzione di glicole etilico con 1%wt di H_2O distillata e 0,25%wt di NH_4F e applicando un potenziale costante di 60 V per 6 ore tra un catodo di Pt e l'anodo di titanio pretrattato.

- *Pre-trattamento termico:* I campioni, dopo l'anodizzazione sono stati sciacquati in alcool isopropilico per eliminare le tracce di glicol etilenico, acqua e fluoruro di ammonio. Le lastrine venivano quindi lasciate per una notte in forno a 80-100 °C ad una pressione controllata di 0,7 bar.

- *Trattamento termico:* Le proprietà del TiO_2 dipendono dalla sua cristallinità e dalla sua morfologia. La titania presenta generalmente tre forme cristalline principali che sono l'anatasio, il rutilo e la brookite. Il trattamento termico serve a cristallizzare i nano-tubi, che si ottengono con il processo di anodizzazione in fase amorfa, in modo da poterne ottimizzare le prestazioni in cella. Da quanto riportato in letteratura e da quanto è stato osservato precedentemente, la struttura anatase è quella che si presta meglio per il processo d'intercalazione dello ione litio.

Le analisi strutturale ai raggi X e quella morfologica al SEM hanno consentito di caratterizzare i diversi campioni prodotti, valutando correttamente le tipologie e quantità di prodotto ottenute.

L'analisi del campione cristallizzato a 500 °C, mostrata in Figura 15, presenta oltre ai picchi del supporto di Ti anche i picchi caratteristici dell'anatase. I picchi a 35°, 40°, 57° e 77° di 2 theta del titanio sono presenti anche alle altre temperature di cristallizzazione.

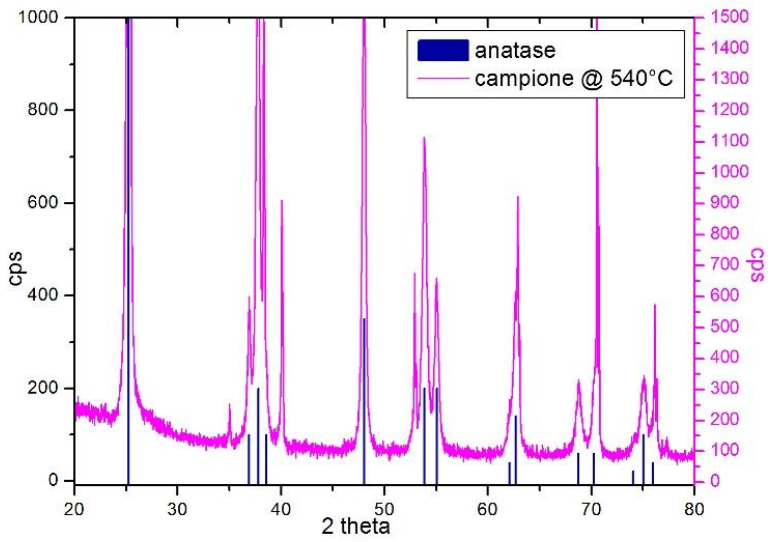


Figura 15. Identificazione della forma anatase nel campione ottenuto con trattamento termico a 540 °C

Sono state fatte le osservazioni al SEM per determinare la morfologia dei nanotubi di TiO_2 - i campioni erano praticamente tutti uguali – in Figura 16 si riportano come esempio le foto al SEM del campione cristallizzato a 560 °C.

Dalle varie osservazioni si può ricavare che la lunghezza media dei nanotubi è di 16-17 µm e lo spessore esterno è di 192 nm costante il calibro dei nanotubi è di 70-100 nm e la superficie è liscia ma non lucida.

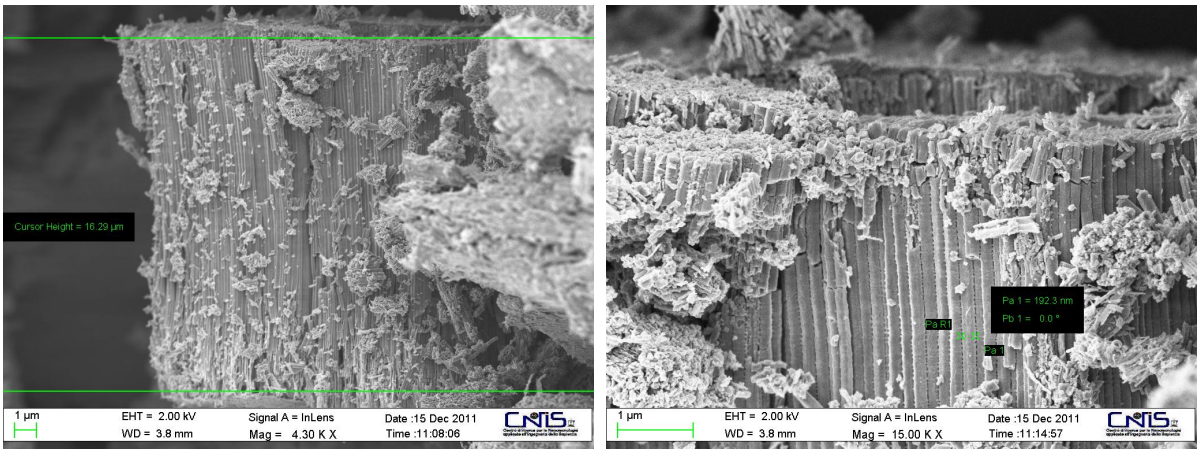


Figura 16. Foto SEM dei nanotubi di TiO_2 con, a destra, un ingrandimento di un particolare

L'ENEA, mediante sintesi elettrochimica, ha preparato quantità più elevate di TiO_2 con lo scopo di ottenere materiali solidi aventi granulometria nanometrica e controllata. Le caratteristiche di tali materiali sono state comparate con quelle di TiO_2 preparato mediante pirolisi laser nei laboratori ENEA e con TiO_2 commerciale [Report RdS/2012/241]. I materiali sono stati caratterizzati in termini di morfologia e tipologia delle particelle e stabilità termica mediante SEM e TGA, rispettivamente [Report RdS/2012/242].

L'ossido di titanio è stato preparato mediante elettrosintesi a partire da dischetti di titanio (grado 1) aventi diametro e spessore pari a 15 mm e 0,5 mm, rispettivamente. I campioni (inseriti in un supporto in PTFE), avevano un'area attiva pari a 1 cm^2. La crescita dei nanotubi di TiO_2 sulla superficie del titanio metallico è stata ottenuta attraverso un processo suddiviso in cinque fasi distinte:

a. pre-trattamento chimico della superficie metallica;
b. pre-anodizzazione galvanostatica;
c. anodizzazione potenziostatica;
d. trattamento termico sotto vuoto a bassa temperatura;
e. trattamento termico in aria ad alta temperatura.

La crescita dei nanotubi di TiO_2, è stata ottenuta mediante anodizzazione potenziostatica dell'elettrodo di titanio, accoppiato con un elettrodo di platino, in una soluzione di glicole etilenico contenente 1% in peso di H_2O distillata e 0,2% (peso) di NH_4F. Una tensione costante pari a 60 mV é stata applicata per un tempo di 3 ore con un potenziostato/galvanostato Aldrich PS251-2. La corrente è stata misurata con un multimetro Keithley 2000 e registrata (nel tempo) con un acquisitore Madge-Tech Volt101 posto in serie ad una resistenza calibrata (300 Ω) Leeds and Northrup.

Tre tipologie di campioni di TiO_2 sono stati sottoposti a caratterizzazione elettrochimica: due prototipali (TiO_2 laser e per via elettrochimica) prodotte dall'ENEA ed una commerciale acquistata per confronto dall'EVONIK e provata anche dall'Università di Roma.

L'analisi morfologica dei materiali investigati [Report RdS/2012/242] è stata condotta mediante misure SEM utilizzando un FESEM con un potenziale di estrazione pari a 1,5 keV ed una *working Distance* pari a 5,4 mm in modo da ottimizzare il risultato finale dell'immagine. Le analisi composizionali sono state effettuate utilizzando un detector EDX (Energy Dispersive X-Ray), che analizza i raggi X creati dall'interazione tra gli elettroni accelerati del FESEM con quelli del campione bersaglio. Le condizioni operative del FESEM sono state selezionate in maniera da ottimizzare la quantità di segnale analizzata dal rilevatore.

La Figura 17 illustra immagini SEM dei nanotubi di TiO_2 ottenuti per via elettrochimica. Si osserva chiaramente la crescita dei nanotubi sul substrato di Ti che presentano altezza e diametro piuttosto omogenei oltre ad essere ben allineati.

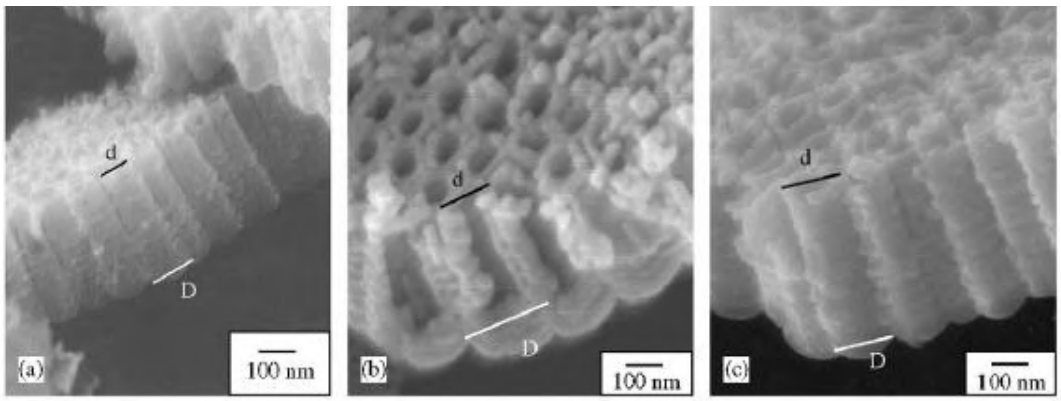
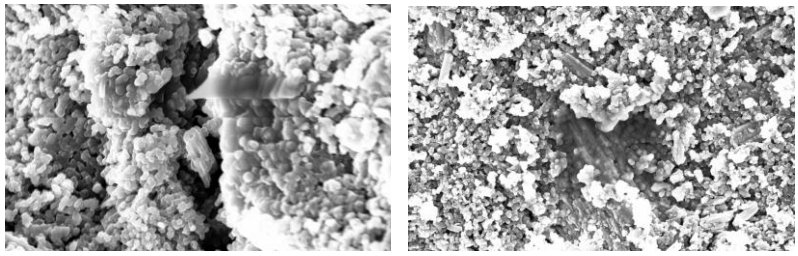
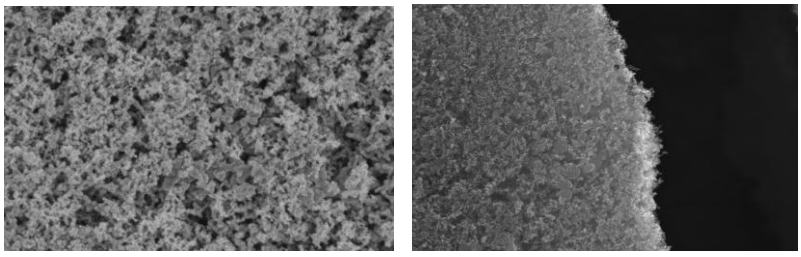


Figura 17. Immagini SEM dei nanotubi di TiO_2 ottenuti per via elettrochimica

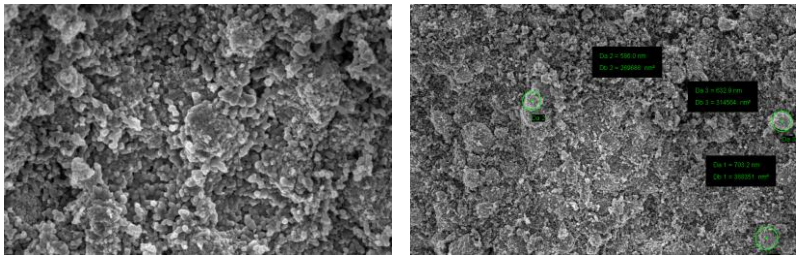
In Figura 18 sono riportate immagini SEM relative ad anodi TiO_2 ottenuto mediante differenti metodologie. Si osserva una granulometria avente dimensione nanometrica abbastanza uniforme per tutti i tipi di TiO_2 investigati che presentano agglomerati (micrometrici) delle relative particelle.



Pannello A - TiO_2 elettrochimico



Pannello B - TiO_2 laser



Pannello C - TiO_2 Evonik

Figura 18. Immagini SEM relative a TiO_2 ottenuto mediante differenti metodologie

Le misure di stabilità termica sono state eseguite in flusso (100 mL/min) di aria sintetica (onde evitare contaminazione con l'esterno) mediante un calorimetro a scansione differenziale. Ossido di alluminio ad elevata purezza è stato utilizzato come materiale di riferimento. I test sono stati condotti su campioni, aventi una massa compresa tra 10 e 12 mg, che sono stati alloggiati in crogioli di platino (sezione pari a 0,32 cm^2). I campioni investigati sono stati conservati, manipolati e pesati in un ambiente ad atmosfera controllata (camera secca, tenore umidità < 10 ppm). La stabilità termica è stata investigata mediante scansioni eseguite a 10 °C/min dalla temperatura ambiente sino a 600 °C.

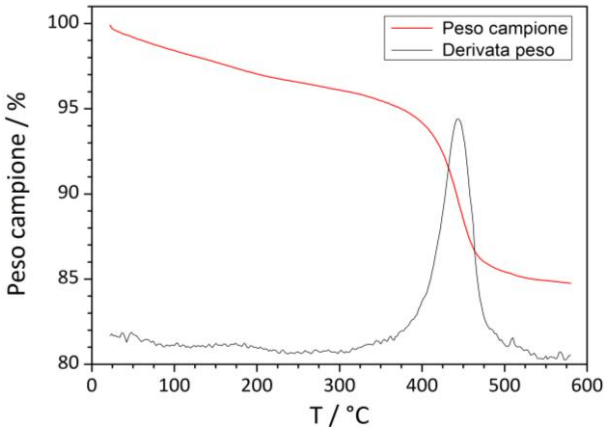


Figura 19. Curva termo-gravimetrica di TiO_2 preparato mediante pirolisi laser. Velocità di scansione: 10 °C/min

I risultati sono riportati in Figura 19 in termini di curva termo-gravimetrica (peso campione in funzione della temperatura) e relativa derivata. Si osserva un decremento progressivo della massa del campione dalla temperatura ambiente sino a 400 °C dovuto alla perdita di acqua (sino 100 °C) assorbita dall'ambiente esterno e, a partire da 100 °C, alla combustione del carbone presente nel campione. Dopo 400 °C (massa del campione pari a 95% rispetto quella iniziale) si osserva una diminuzione più rapida della massa del campione, evidenziata dal netto picco della derivata del peso (Figura 19), dovuta alla decomposizione termica di TiO_2. A temperature superiori a 450 °C la perdita in peso risulta molto meno accentuata in seguita alla formazione di composti termicamente stabili alle alte temperature.

Successivamente gli anodi a base di TiO_2 sono stati caratterizzati in semi-celle Li/elettrolita liquido/Anodo in termini di capacità, cicli di vita ed efficienza coulombica a differenti regimi di corrente [Report RdS/2012/242]. I nastri anodici sono costituiti dal materiale attivo (TiO_2), un conduttore elettronico (carbone Super-P, MMM

Carbon) ed un legante polimerico (PTFE). Tutti i componenti sono stati preventivamente essiccati sotto vuoto a 120 °C. Il materiale attivo ed il carbone sono stati intimamente miscelati tra loro (in giragiare o mortaio) prima della preparazione degli elettrodi per almeno 10 minuti. Questa procedura consente di ottenere un'adeguata ricopertura (*coating*) delle particelle di materiale attivo (aventi dimensioni pari a 1-2 µm) con quelle di carbone (30 nm) al fine di assicurare una buona conduzione elettronica attraverso l'elettrodo.

In Tabella 2 sono schematizzate le metodologie di preparazione e la provenienza dei materiali TiO_2 investigati. La Figura 20 illustra una foto dei nastri anodici compositi ottenuti dopo calandratura.

Tabella 2. Materiali attivi TiO_2 impiegati nella preparazione degli elettrodi

Metodologia preparazione	Provenienza
sintesi elettrochimica	ENEA
sintesi mediante laser	ENEA
commerciale	Evonik P25

Figura 20. Nastro anodico composito TiO_2-carbone-PTFE ottenuto dopo calandratura

Le prestazioni degli anodi a base di TiO_2 preparato in ENEA per via elettrochimica sono riportate in Figura 21. Un plateau attorno 1,7 V interessa quasi tutto il profilo di scarica (pannello superiore), indicando che gli anodi investigati erogano energia a tensione costante (caratteristica molto apprezzata nelle applicazioni in batteria). L'aumento della densità di corrente comporta un plateau in scarica progressivamente meno pronunciato dovuto all'esaltazione dei fenomeni diffusivi nell'elettrodo e nell'elettrolita. Di converso, si osserva un moderato incremento della caduta ohmica anche per aumenti molto elevati del regime di corrente (300 mV a C/10 contro 600 mV a 3C). Gli anodi investigati, in grado di erogare circa il 99% della capacità teorica (168 mAh/g) a C/10, forniscono elevate capacità (125 mAh/g pari a oltre 74% capacità teorica) anche a regimi medio-alti (C/2). Ad elevati regimi di corrente (> 1C) gli anodi presentano ancora capacità apprezzabili (80 mAh/g e 60 mAh/g a 2C e 3C, rispettivamente). Pertanto circa il 36% della capacità erogata a C/10 (prossima a quella teorica) viene fornita a 3C ovvero ad una densità di corrente 30 volte superiore. Questo comportamento, che risulta appetibile in celle per applicazioni di potenza, è dovuto alla veloce cinetica del processo di intercalazione del catione Li^+ in TiO_2.

I valori di capacità specifica, erogati in funzione del numero di cicli a differenti regimi di corrente, sono riportati nel pannello inferiore della Figura 21. Si osserva un'elevata ritenzione di capacità, unitamente ad un'efficienza coulombica prossima al 100%, nel corso dei cicli di scarica/carica anche a elevati regimi di corrente (3C). Ciò suggerisce che il processo di intercalazione del catione Li^+ in TiO_2 elettrochimico avviene senza alcuna distorsione apprezzabile del reticolo Ti-O.

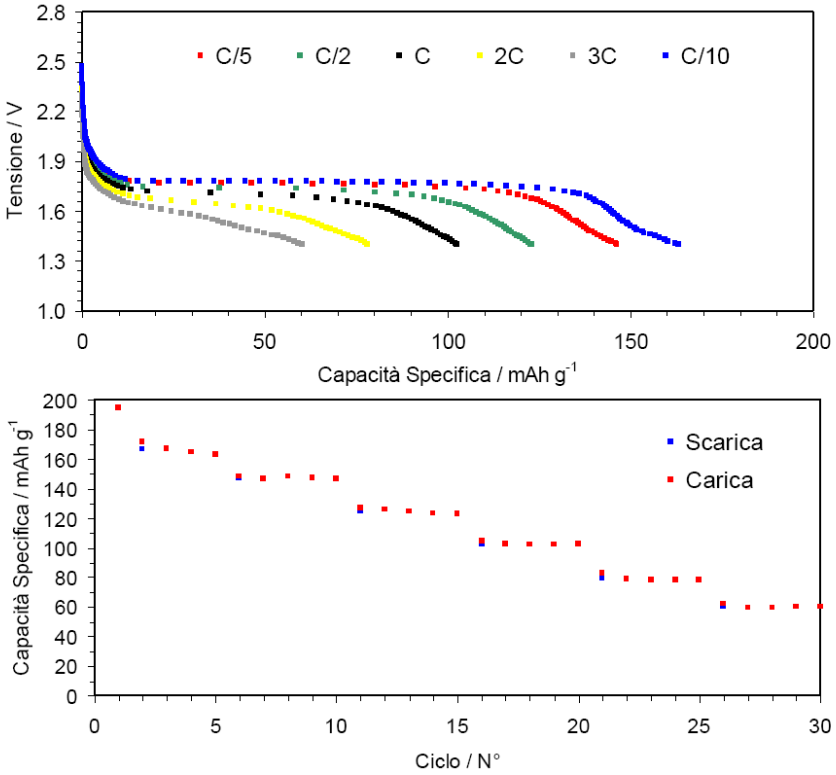


Figura 21. Profili di scarica tensione - capacità (pannello superiore) e capacità specifica - numero cicli (pannello inferiore) a differenti regimi di corrente per celle Li/LiPF$_6$-EC-DEC/TiO$_2$ elettrochimico. T = 20 °C

Gli anodi a base di TiO_2 elettrochimico sono stati sottoposti anche a prolungati cicli di scarica/ carica, eseguiti a una profondità di scarica (DOD) pari a circa il 100%, al fine di verificarne le prestazioni in condizioni gravose. I risultati, riportati in Figura 22, mostrano un decremento quasi lineare di capacità specifica erogata che, al 100° ciclo, risulta pari a circa il 63% di quella iniziale (corrispondente ad una perdita media in capacità pari allo 0,6% ad ogni ciclo). I dati ottenuti indicano una buona riproducibilità delle prestazioni e, pertanto, della procedura di preparazione degli anodi.

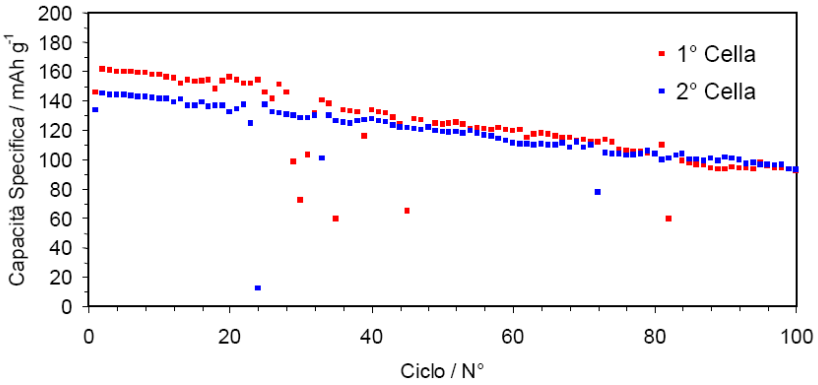


Figura 22. Profili di capacità specifica - numero cicli (pannello inferiore) per celle Li/LiPF$_6$-EC-DEC/TiO$_2$ elettrochimico. Regime di corrente: C/10. T = 20 °C

Analoghe caratterizzazioni sono state svolte per i campioni acquistati o prodotti con metodo alternativo per via laser hanno consentito di valutare i vantaggi e svantaggi dei diversi metodi. I valori di capacità specifica, erogati in scarica a differenti densità di corrente da anodi a base di TiO_2 preparato secondo differenti tipologie, sono confrontati in Figura 23. I risultati mostrano chiaramente che il materiale preparato in ENEA per via elettrochimica esibisce le migliori prestazioni sia in termini di valore assoluto di capacità che ritenzione di capacità.

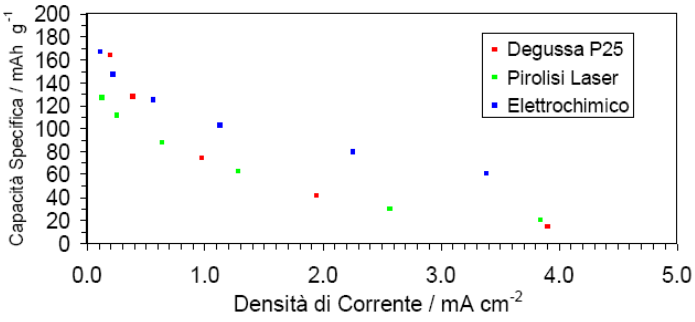


Figura 23. Dipendenza della capacità specifica in funzione della densità di corrente erogata (in scarica) da anodi a base di TiO_2 (preparato secondo differenti tipologie). T = 20 °C

Inoltre è stato deciso di condurre, in parallelo, un'investigazione elettrochimica più dettagliata su anodi costituiti da nanotubi di ossido di titanio (TiO_2) ottenuti mediante ossidazione di un substrato in titanio. Gli anodi sono stati investigati in semicelle anodiche Li/elettrolita liquido/Anodo in termini di capacità, cicli di vita ed efficienza coulombica a differenti regimi di corrente [Report RdS/2012/243]. Circa il 92% della capacità teorica è erogata a C/10 mentre ad elevati regimi di corrente (≥ 1C) la capacità fornita non supera un terzo del valore teorico. Tuttavia, i valori di capacità forniti dai nano-tubi di TiO_2, soprattutto ad elevate densità di corrente, sono da considerarsi tra le più elevate (se non le più elevate in assoluto) relativamente ad elettrodi che non impiegano alcun additivo ad elevata conduzione elettronica. Cicli prolungati eseguiti al 100% DOD hanno mostrato un decremento progressivo in capacità che, dopo 200 cicli consecutivi di scarica/carica, risulta pari al 58% del valore iniziale, corrispondente ad una perdita pari a 0,2% ad ogni ciclo. Quest'ultima, tuttavia, è risultata dovuta ad impoverimento di elettrolita nel separatore. L'efficienza coulombica si mantiene prossima al 100% anche dopo prolungati cicli di scarica/carica.

Dopo 200 cicli consecutivi di scarica/carica, una ulteriore quantità di soluzione elettrolitica è stata addizionata alla cella. I risultati, riportati nel pannello inferiore della Figura 24, mostrano che il decadimento in capacità è correlato all'impoverimento di elettrolita nel separatore piuttosto che alle caratteristiche del materiale anodico. Dopo il ripristino della soluzione elettrolitica si osserva, difatti, un progressivo incremento in capacità verso i valori iniziali. L'efficienza coulombica si mantiene prossima al 100% anche dopo prolungati cicli di scarica/carica condotti al 100% di DOD.

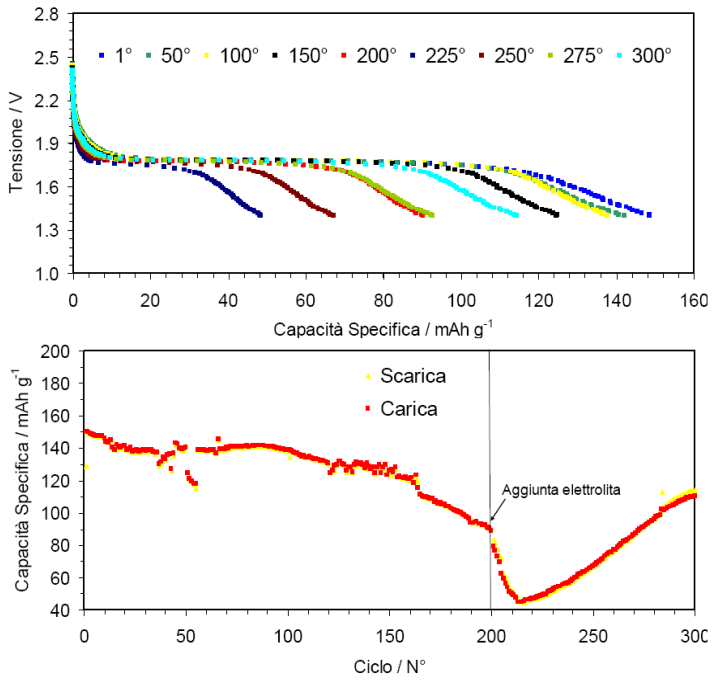


Figura 24. Profili tensione/capacità (pannello superiore) ed evoluzione della capacità specifica (pannello inferiore) per celle Li/$LiPF_6$-EC-DEC/TiO_2 sottoposte a prolungati cicli di scarica/carica a C/10. T = 20 °C

C. Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio

I materiali anodici e catodici selezionati e sviluppati (Obiettivi A e B) saranno poi integrati in celle complete di elettrolita (liquido e/o polimerico), opportunamente progettate in scala da laboratorio per la verifica delle prestazioni in condizioni operative prossime a quelle dell'uso finale. Inoltre, dopo aver selezionato i due sistemi più interessanti (uno di alta potenza e l'altro di alta energia) verranno progettate e realizzate celle di dimensioni maggiorate per verificare l'effetto di scala sulle prestazioni finali ed acquisire maggiori informazioni sugli aspetti realizzativi. Tutte le celle prodotte verranno sottoposte a cicli di prova per verificarne prestazioni e vita utile, secondo le procedure di prove (elettrochimiche ed elettriche) sviluppate e concordate con CNR ed RSE, in diverse condizioni operative tipiche delle applicazioni considerate. In aggiunta sono state svolte delle analisi economiche sui costi di produzione del litio ferro fosfato.

Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Bologna, di Camerino e "La Sapienza" di Roma.

L'università di Bologna [Report RdS/2012/235] ha effettuato la caratterizzazione elettrochimica di celle da laboratorio, utilizzando i materiali ed i componenti descritti nell'Obiettivo A, insieme a componenti anodici descritti nell'Obiettivo B e forniti da altri partecipanti al progetto. Le prove sono state condotte includendo cicli di carica (CC-CV) –scarica (CC) a diverse C-rate (regimi di carica e scarica a corrente costante) e diversi cut-off di potenziale a due temperature. Inoltre sono state svolte prove per la valutazione della capacità di carica, di scarica e della stabilità delle celle a ripetuti cicli, condotti anche secondo protocolli concordati con ENEA.

Elettrodi M100-II sono stati anche caratterizzati a 50 °C secondo i Protocolli ENEA A, B e C, i cui schemi sono di seguito riportati (Figura 25), in celle Li/LP30/M100-II, utilizzando il Li in eccesso.

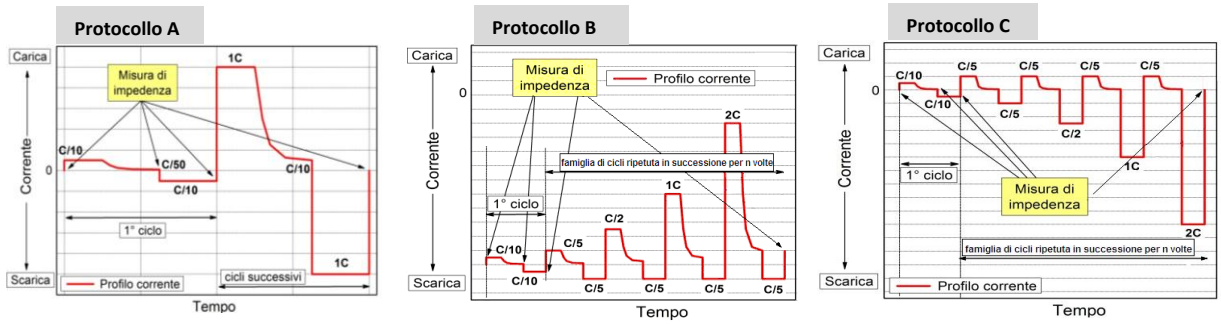


Figura 25. Schematizzazione dei Protocolli ENEA. Protocollo A: ciclazione standard a 1C per 100 cicli. Protocollo B: ciclazioni a differenti condizioni di carica. Protocollo C: ciclazioni a differenti condizioni di scarica

La Figura 26 mostra i risultati di ciclazioni standard a 1 C in LP30 e a 50 °C, condotte secondo il Protocollo A sulla cella con l'elettrodo Q8 (2,61 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$); la Figura 27 mostra i risultati della ciclazione a differenti condizioni di carica per 10 famiglie di cicli, condotta secondo il Protocollo B sulla cella con elettrodo Q6 (2,69 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$); la Figura 28 mostra i risultati della ciclazione a differenti condizioni di scarica per 10 famiglie di cicli, condotta secondo il Protocollo C sulla cella con elettrodo Q11 (2,08 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$).

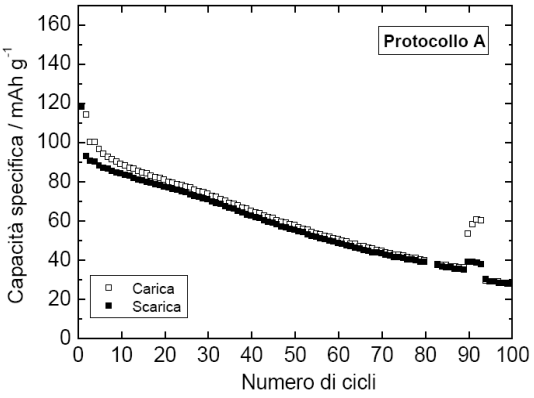


Figura 26. Capacità specifica (riferita a $LiMnPO_4$) della cella con elettrodo Q8 vs. numero di cicli. Cut off di potenziale: 2,5 V - 4,6 V vs Li

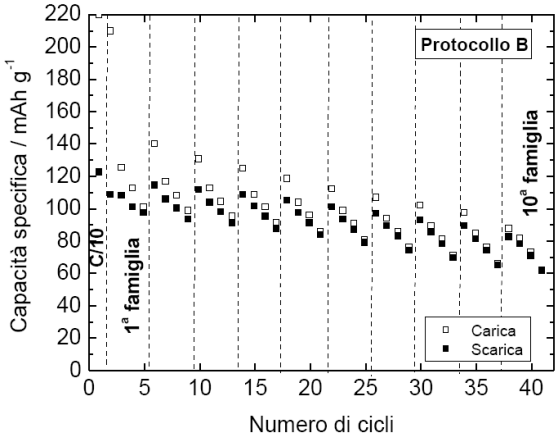


Figura 27. Capacità specifica (riferita a $LiMnPO_4$) della cella con elettrodo Q6 in differenti condizioni di carica per 10 famiglie di cicli. Cut off di potenziale: 2,5 V - 4,6 V vs Li

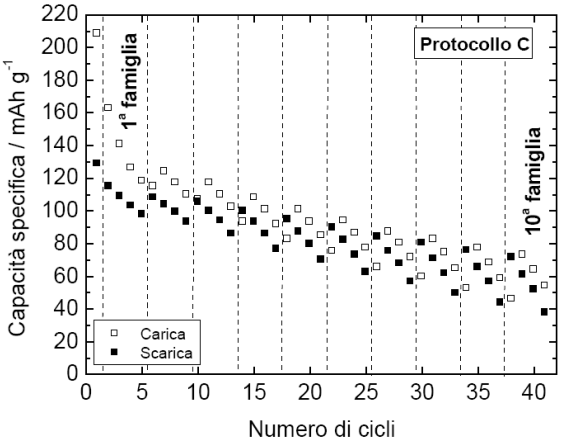


Figura 28. Capacità specifica (riferita a $LiMnPO_4$) della cella con elettrodo Q11 in differenti condizioni di scarica per 10 famiglie di cicli. Cut off di potenziale: 2,5 V - 4,6 V vs Li

I test condotti secondo i protocolli ENEA B e C confermano la buona capacità sia di carica che di scarica, per 10 famiglie di cicli, delle celle *vs.* litio con catodi a base di M100-II ed elettrolita convenzionale LP30, e quelli condotti secondo il Protocollo A a 1C evidenziano una perdita di capacità per ciclo di ca. 0,6-0,7%, analoga a quella riscontrata per i cicli a 0,1 C riportati in Figura 26. I test di impedenza non evidenziano alla fine dei Protocolli aumenti di impedenza a 1 kHz tali da pregiudicare il processo di carica delle celle alle C-rate più elevate, mentre l'aumento dell'impedenza alle più basse frequenze rivela che il processo di carica profonda della cella diventa via via più difficoltoso con il progredire di cicli.

E' stata fornita all'Università di Bologna dall'Università di Camerino una stesa (ca. 3,5 cm x 10,5 cm) a base di SnO_2-grafene (GSN13) su collettore di Cu, da cui sono stati punzonati 10 elettrodi circolari di diametro 0,9 cm (area 0,64 cm^2). I vari elettrodi sono stati pesati ed il carico di materiale attivo (SnO_2-C) valutato era nell'intervallo 0,99-1,48 mg cm^{-2}.

Sulla base dei risultati elettrochimici trasmessi dall'Università di Camerino relativamente ad un elettrodo con carico di materiale attivo di 1,4 mg cm^{-2} ciclato in cella vs litio a varie C-rate (C/10, C/5, C/2 e 1C; 10 cicli per ogni C-rate intervallati da 2 cicli a C/10) si è constatato che la capacità irreversibile al 1° ciclo è ca. 50% della capacità di carica e che il calo di capacità al progredire della sequenza dei cicli è estremamente elevato a causa del sovrapporsi di un forte calo di capacità dovuto all'aumento della sovratensione con l'aumentare della C-rate, con quello dovuto all'instabilità a ripetuti cicli (comportamento verificato anche da ENEA con test su alcuni elettrodi dell'Università di Camerino). Questo ha reso problematico il bilanciamento dei carichi dei due elettrodi nell'assemblaggio della batteria GSN13//M100-II: mentre il calo di capacità, in cella vs. litio, del catodo a base di M100-II è ca. del 40% passando dal ciclo iniziale a C/10 al ciclo a 1C della 10a famiglia (40 cicli totali), quello dell'elettrodo a base di GSN13, passando da C/10 ad 1 C (ca. 40 cicli) era dell'80%.

Pertanto non si è ritenuto opportuno testare secondo i Protocolli ENEA le batterie con elettrodi bilanciati sulla base della loro capacità ai primi cicli a C/10 (si sarebbero, nei cicli successivi, fortemente sbilanciate rendendo inapplicabili i Protocolli di test). Pertanto prima dell'assemblaggio delle batterie gli anodi sono stati preciclati per una decina di cicli a C/5 e 1C in modo da minimizzare il calo di capacità, mentre i catodi sono stati preciclati con 1 ciclo a C/5 ed 1 ciclo a 1C. Le batterie sono state assemblate con un rapporto fra la capacità (in mAh cm^{-2}) dell'anodo e quella del catodo che andava da 1,2 a 1,4 ed è stato applicato il Protocollo A operando ad una C-rate di 1C, calcolata sul valore di capacità teorica del catodo, al fine di mostrare l'operatività della batteria GSN13//M100-II con elettrolita LP30, senza però speculare sui valori di capacità specifica della batteria.

Alcuni risultati relativi all'assemblaggio (preciclaggio degli elettrodi) e test di due batterie a 50 °C in LP30 vengono di seguito riportati. Una batteria è stata assemblata, in configurazione con un elettrodo di riferimento di litio, con anodo G9 (0,99 mg cm^{-2} di materiale attivo) e catodo Q14 (3,59 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$); dopo preciclaggio con 2 cicli a C/5 (0,196 mA cm^{-2}) e 7 cicli a 1C (0,978 mA cm^{-2}) l'anodo era in grado di erogare a 1C e 50°C una capacità di 0,55 mAh cm^{-2} (corrispondente a 560 mAh/g di materiale attivo), mentre il catodo, preciclato con 1 ciclo a CC C/5 (0,122 mA cm^{-2})- CV C/10 e scarica a C/5, ed 1 ciclo CC 1C (0,611 mA cm^{-2})-CV C/10 e scarica a 1C e 50°C, erogava 0,38 mAh cm^{-2} (corrispondente a 104 mAh/g di $LiMnPO_4$). Essendo nella batteria G9//Q14 l'anodo in eccesso rispetto al catodo (rapporto fra la capacità in mAh cm^{-2} di 1,4) sono stati fissati come valori di cut off di potenziale di carica e scarica quelli del catodo, 4,6 V e 2,5 V vs riferimento. La Figura 29 mostra i profili di potenziale e i valori di capacità della batteria (riferiti al peso del solo materiale attivo del catodo) durante i primi cicli di applicazione del Protocollo A a CC 1C – CV C/10 con correnti di carica/scarica di 0,611 mA cm^{-2}, valutate sulla capacità teorica del catodo (elettrodo limitante).

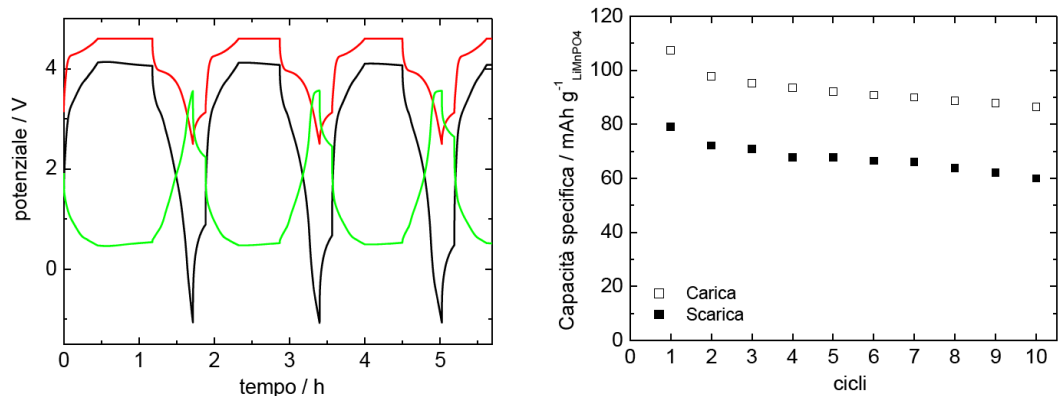


Figura 29. Profili di potenziale del catodo (rosso), dell'anodo (verde) e della batteria G9//Q14 (nero) con LP30 durante i primi 3 cicli a 1C a 50 °C e valori di capacità riferiti al peso del solo $LiMnPO_4$

Come si può vedere dalla Figura 30, durante la carica della batteria il catodo si carica completamente e l'anodo non riesce ad andare al di sotto di 0,5 V; durante la scarica della batteria, il catodo si scarica completamente (la bassa efficienza è determinata dal fatto che la capacità di scarica è stata valutata fino al raggiungimento del potenziale di cella di 0 V) a discapito dell'anodo che raggiunge potenziali molto positivi, anche superiori al potenziale limite di scarica del catodo. E' evidente che tale batteria non funziona in modo corretto.

Un'altra batteria è stata assemblata con l'anodo G8 (1,08 mg cm^{-2} di materiale attivo), che alla fine di 20 cicli di preciclaggio erogava a 1C (1,07 mA cm^{-2}) e 50 °C una capacità di 0,22 mAh cm^{-2} (corrispondente a 206 mAh/g di materiale attivo) e con il catodo Q10 (1,58 mg cm^{-2} di $LiMnPO_4$) che mostrava a C/5 (0,054 mA cm^{-2}) una capacità di 0,18 mAh cm^{-2} (114 mAh/g di materiale attivo). Alla batteria G8//Q10 con l'anodo in eccesso rispetto al catodo (rapporto fra la capacità in mAh cm^{-2} di 1,2) sono stati fissati come valori di cut off di potenziale di carica e scarica vs. riferimento, rispettivamente 4,6 V e 2,5 V per il catodo e 0 V e 2,0 V per l'anodo, limitando in tal modo entrambi gli elettrodi nel loro intervallo di stabilità, ed era applicata una corrente di carica e scarica di 0,156 mA cm^{-2}, circa corrispondente ad una C-rate di 1C pratico. Anche in questo caso, essendo il catodo l'elettrodo limitante, i valori di capacità della batteria G8//Q10 sono riferiti al peso del solo materiale attivo del catodo. Come si può vedere dai profili di potenziale di Figura 30, il 1° ciclo è contraddistinto da una capacità di carica e di scarica rispettivamente di 104 e 70 mAh/g di $LiMnPO_4$, mentre già a partire dal 2° ciclo il catodo raggiunge il cut-off impostato di 4,6 V con una carica inferiore (78 mAh/g) che però non viene rilasciata totalmente in quanto l'anodo raggiunge il cut-off di scarica, e questo fenomeno si amplifica nei cicli successivi.

Sulla base dei risultati ottenuti con l'applicazione del Protocollo A non si è ritenuto opportuno procedere con l'applicazione degli altri due Protocolli.

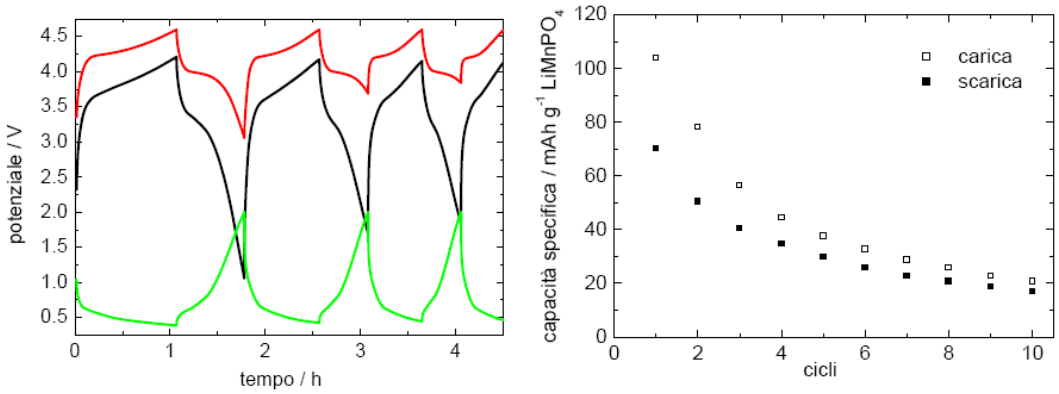


Figura 30. Profili di potenziale del catodo (rosso), dell'anodo (verde) e della batteria G8//Q10 (nero) con LP30 durante i primi 3 cicli a 1C (pratico) a 50 °C e valori di capacità riferiti al peso del solo $LiMnPO_4$

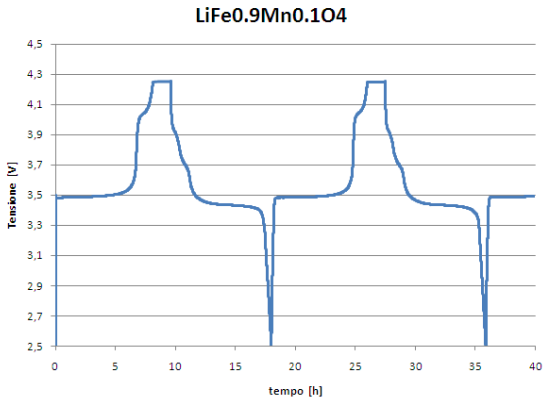


Figura 31. Primi due cicli galvanostatici del Gm26A_1 (750 °C) al rate di C/10

L'Università di Roma [Report RdS/2012/234] ha realizzato celle da laboratorio complete su cui ha eseguito prove di ciclazioni galvanostatiche a diversi rate di scarica e carica (C/10, C/6, C/4, C/2 e C) con potenziale limite inferiore di 2,5 V e quello superiore di 4,25 V; alla fine di ogni carica veniva imposta una carica potenziostatica e mantenuta fino a che la corrente non raggiungeva 1/10 della corrente di carica. Nella Figura 31 sono stati riportati i primi cicli di scarica e carica del campione Gm26.

Già dalle prime prove elettrochimiche fatte a C/10, si possono trarre le seguenti osservazioni: nella carica, il litio che si de-intercala dal campione a due diversi potenziali il primo a 3.5 V e il secondo appena sopra i 4 V. Questo vuol dire che il litio è alloggiato in siti ai quali è associato un diverso potenziale chimico. Nella scarica il litio si intercala in siti differenti ai quali corrispondono potenziali di 3,9, 3,7 e 3,4 V. Questo comportamento è stato interpretato assumendo che lo ione Li^+ inizialmente fuoriesce dalla struttura dell'$LiFePO_4$: infatti il primo plateau è situato al potenziale tipico della de-intercalazione del litio dall'$LiFePO_4$, successi-vamente viene rilasciato ad un potenziale (ca. 4,0 V) che è tipico dell'intercalazione del litio nell'$LiMnPO_4$. Sebbene i raggi X non abbiano fornito alcuna indicazione sulla presenza di $LiFePO_4$ e $LiMnPO_4$ le prove elettrochimiche hanno mostrato l'esistenza nella fase solida di intrusioni della fase $MnPO_4$ nella fase $FePO_4$, e non si è ottenuto il drogaggio sperato. Ci si aspettava che il Mn prendesse il posto del Fe dando luogo ad una omogeneità di composizione nella struttura, cioè non si è formata un'unica fase di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ ma una miscela intima di $LiFePO_4$ e $LiMnPO_4$. Tale risultato ha fatto desistere per ora dal sintetizzare altri materiali che avessero un maggior quantitativo di Mn. Si è tentato di cambiare le condizioni di sintesi per cercare di vedere se fosse possibile ottenere la fase desiderata $LiMn_{0,.1}Fe_{0,9}PO_4$.

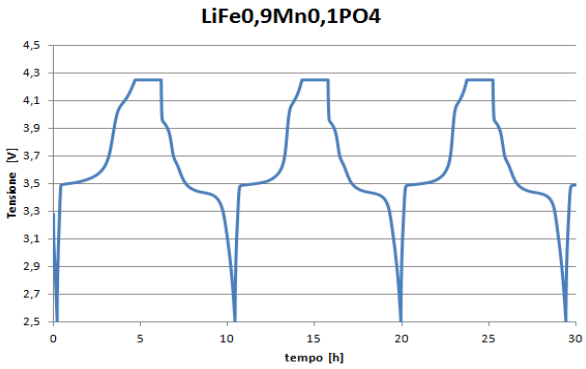


Figura 32. Cicli galvanostatici del Gm27 (850 °C) ad un rate di C/10

Il campione Gm27A, preparato a 850 °C, presenta lo stesso comportamento. Nella Figura 32 sono riportati i primi cicli.

Anche il campione Gm30, preparato a 700 °C manifesta lo stesso comportamento, nella Figura 33 sono riportati i cicli 4, 5 e 6.

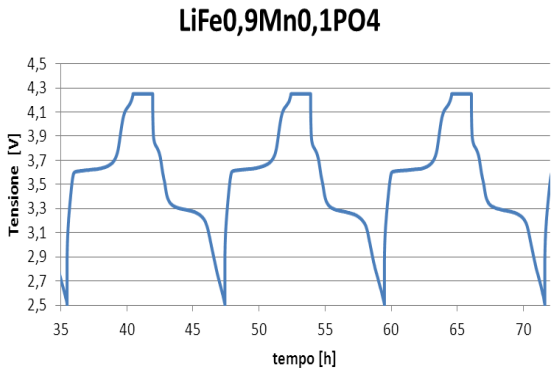


Figura 33. Cicli galvanostatici del Gm30 (700 °C) ad un rate di C/10

Infine si riportano i grafici delle capacità in funzione del numero di cicli per i diversi materiali. Le ciclazioni galvanostatiche sono state ottenute a diversi rate di scarica e carica con la solita carica potenziostatica a fine carica, come abbiamo visto nelle figure che abbiamo poc'anzi mostrato.

Per primo in Figura 34 il comportamento del campione preparato con un solo trattamento a 750 °C, con regimi di scarica a C/10 e C/4.

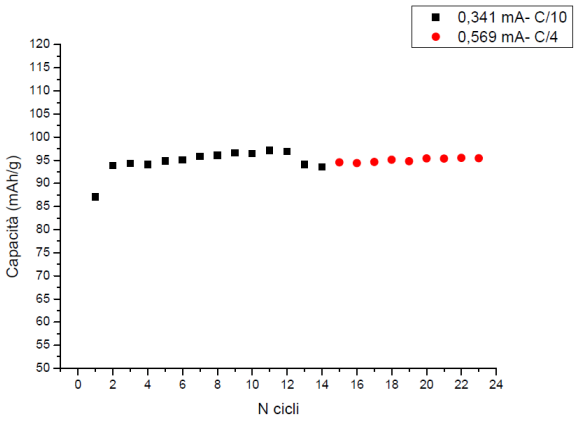


Figura 34. Ciclazione del campione Gm26 preparato con un solo trattamento termico a 750 °C

È evidente che il campione ha una capacità che è circa il 60% della capacità teorica e che non mostra grosse differenze quando si aumenta la corrente.

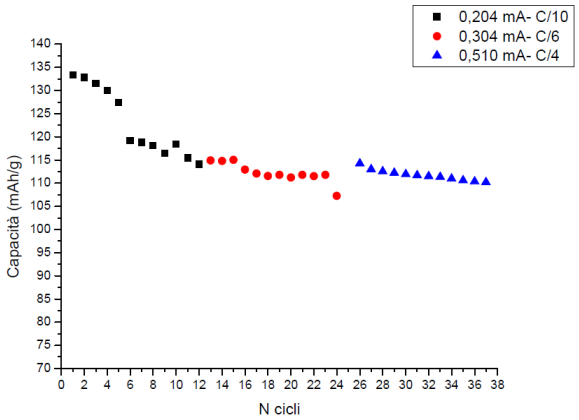


Figura 35. Ciclazione del campione Gm26A preparato con due trattamento termici a 750 °C

Nella Figura 35 invece si può vedere l'effetto del secondo trattamento termico. Il mescolamento tra i due trattamenti termici migliora la formazione di nanoparticelle e di conseguenza si riesce a sfruttare meglio il materiale, infatti la capacità è più alta.

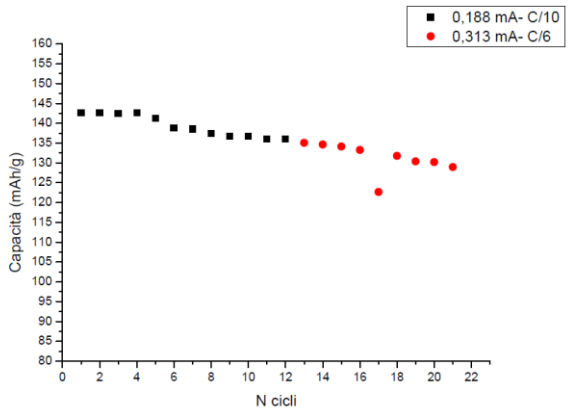


Figura 36. Ciclazione del campione Gm26A_1 preparato a 750 °C con due trattamenti termici

Nella Figura 36 si riportano i risultati ottenuti preparando un catodo con una formulazione diversa (LFMP 85% - PVDF = 7% - Super-P = 8%). La maggiore quantità di grafite aggiunta al materiale attivo migliora il contatto tra le particelle e si ottiene come risposta una più elevata capacità. Anche per questa cella si nota come, aumentando la corrente, la cella non ne risente.

Per ultimo (Figura 37), è stato preparato il campione più economico, Gm30, che ha subìto un solo trattamento termico a 700 °C.

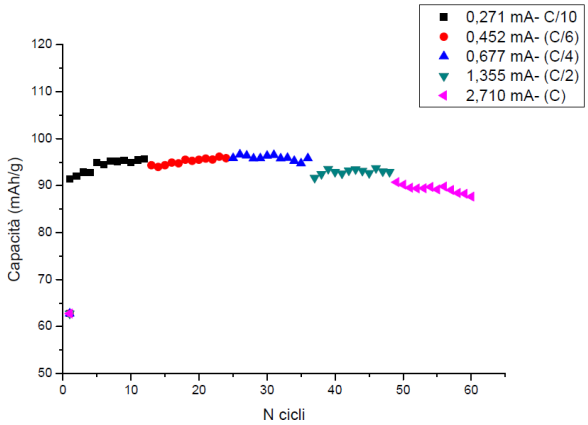


Figura 37. Ciclazione del campione Gm30 preparato a 700 °C con un solo trattamento termico

Il materiale ha una capacità che è circa il 60% di quella teorica, ma la sua capacità rimane praticamente costante all'aumentare della corrente di ciclazione e a C rate dà quasi la stessa capacità ottenuta a C/10. Abbiamo interpretato questo comportamento con il fatto che il volume di cella è maggiore di quello dell'$LiFePO_4$ e per questo la cinetica di intercalazione e deintercalazione è più alta.

Inoltre, L'Università di Roma ha provato i materiali anodici cristallizzati [Report RdS/2012/234], a base di TiO_2, a differente temperatura (500, 540, 560 °C). Sulle celle da laboratorio "a T" a tre elettrodi, sono state effettuate ciclazioni galvano statiche a rate di carica costante e rate di scarica variabile. La procedura di ciclazione effettuata secondo il protocollo ENEA ha previsto:

- 5 cicli: scarica a C/10, carica a C/10;
- 5 cicli: scarica a C/5, carica a C/10;
- 5 cicli: scarica a C/2, carica a C/10;
- 5 cicli: scarica a 1C, carica a C/10;
- 5 cicli: scarica a 2C, carica a C/10.

Di seguito, a titolo di esempio, vengono riportate, nella Figura 38, le capacità in scarica in funzione del numero di cicli, alle diverse velocità del materiale preparato a 540°C, va ricordato che la capacità teorica del materiale attivo è pari a 335 mAh/g.

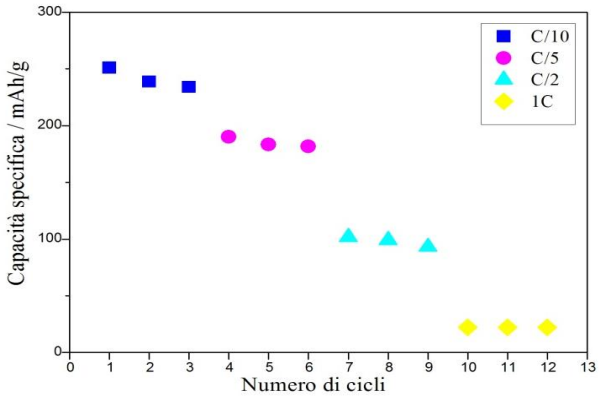


Figura 38. Capacità in scarica del campione trattato a 540 °C

L'Università di Camerino ha effettuato la caratterizzazione elettrochimica dei vari compositi a base di grafene utilizzando la stessa procedura descritta nel caso di RGO (Obiettivo B) e varie tecniche elettrochimiche [Report RdS/2012/236].

I cicli galvanostatici eseguiti a diverse velocità di carica e scarica hanno dato i seguenti risultati:

- SnO_2/RGO. La capacità al primo ciclo è molto elevata (circa 1500 mAh/g calcolati sul peso del materiale attivo SnO_2 + RGO) con un'efficienza coulometrica al primo ciclo pari a circa 20%. Nei cicli successivi a velocità di carica/scarica diversi la capacità reversibile dipende dai regimi adottati. Ove la scarica sia limitata a 600 o 800 mAh/g le capacità al 40° ciclo sono pari a 520 e 390 mAh/g. Se nessun limite è posto in termini di capacità e l'elettrodo è operato tra i potenziali di cut-off 2-0,005 V vs Li dopo cinque cicli la capacità residua è solo il 60% di quella iniziale. Limitando la capacità utile si opera in un range di potenziale più stretto e si evita la formazione della lega a più alto contenuto di litio. Questo sembra un metodo efficace per aumentare la stabilità degli elettrodi.
- SnO_2/RGO/ PAA. Le prestazioni elettrochimiche degli elettrodi sono state valutate a quattro diverse velocità di carica scarica (50, 100, 200 e 500 mA/g) nell'intervallo 0,005 -2 V ed in termini di stabilità su 100 cicli alla velocità massima. La capacità irreversibile al primo ciclo di carica è pari a circa 1800 mAh/g con un'efficienza coulombica pari a circa il 50%. Nei cicli successivi la capacità decade lentamente a valori vicini a 450 mAh/g al 45° ciclo. La ciclazione alla velocità di 500 mA/g per 100 cicli ancora mostra un lento decadimento della capacità reversibile che al 100° ciclo è pari a 430 mAh/g.
- Si/RGO
  - Si/RGO1. Gli elettrodi preparati con questo composito perdono rapidamente capacità e raggiungono valori paragonabili o più bassi rispetto a quelli della grafite. Questo dimostra che il metodo di preparazione non è efficace;
  - Si/RGO2. Questi elettrodi, preparati da Si nanocristallino appaiono più efficienti di quelli preparati utilizzando il precursore organico. L'efficienza al primo ciclo è dell'ordine del 60% ed aumenta con l'aumentare del numero dei cicli sino ad attestarsi intorno al 90%. La capacità reversibile è dell'ordine di 600 mAh/g dopo 20 cicli con valori di partenza superiori a 1400 mAh/g a velocità di carica/scarica di 200 mA/g nei cicli iniziali. Le perdite di capacità sono minori a velocità di carica/scarica elevate perché, a causa della polarizzazione, la quantità di Li che reagisce è minore del valore massimo (x=4.4 in LixSi) e minore è lo stress meccanico.
- Sb/RGO. Il materiale attivo è stato preparato come descritto per SnO_2/RGO. I test elettrochimici sono stati condotti a velocità variabile tra 50 mA/g e 2 A/g. La capacità decresce con l'aumentare della velocità di carica e scarica da valori dell'ordine dei 600 mAh/g fino a 200 mAh/g alla velocità di 2 A/g. Alla velocità di 500 mA/g la capacità è stabile per 100 cicli con una capacità media dell'ordine di 260 mAh/g.

Esempi di prove elettrochimiche sono riportati in Figura 39 e 40. La completa descrizione della caratterizzazione fisica ed elettrochimica di tutti i campioni prodotti è riportata in [Report RdS/2012/236], oltre alle prove in celle complete riportate in [Report RdS/2012/235]. In Figura 41 sono mostrati alcuni cicli di carica e scarica effettuati a differenti correnti specifiche con elettrodi costruiti utilizzando RGO come componente attivo. Figura 40 mostra le curve di capacità differenziale in funzione del potenziale.

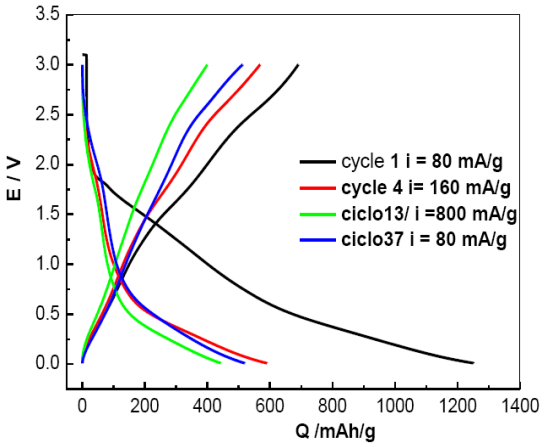


Figura 39. Cicli galvanostatici a differenti correnti specifiche

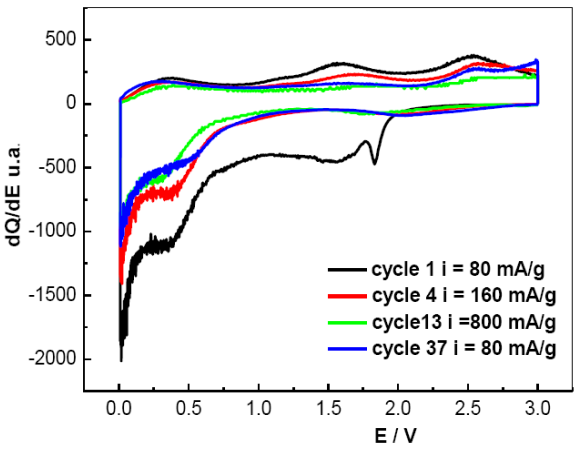


Figura 40. Curve di capacità differenziale calcolate dai cicli galvanostatici in Figura 39

La capacità al primo ciclo è di circa 1250 mAh/g con una efficienza coulombica pari al 55%. La capacità in eccesso è da attribuirsi alla passivazione dell'elettrodo conseguente alla formazione del c). Dalla Figura 44 si deduce che la formazione del SEI avviene nell'intervallo di potenziale 1,8-0,5 V vs Li e quindi a potenziali più anodici di quelli che si trovano normalmente in elettrodi di grafite (0,7-0,8 V). Questo fa pensare che, insieme alla riduzione del solvente, la formazione del SEI sia accompagnata da processi di riduzione di gruppi ossigenati residui presenti nel campione di RGO. Nessuna spiegazione soddisfacente è stata trovata per il picco presente a circa 1,8 V.

Le capacità nei cicli anodici e catodici dipendono chiaramente dalla velocita di carica e scarica. Dopo circa 40 cicli la capacità a 80 mA/g è dell'ordine di 400-420 mAh/g e scende a valori vicini a quelli della grafite per velocità di scarica più elevate. La capacità di intercalare litio dell'RGO dipende in larga misura, oltre che dalla velocità di carica e scarica, dal numero di layer singoli dei compongono ciascun strato. E' quindi evidente che, oltre a risolvere i problemi di stabilità, lavoro addizionale è richiesto per la messa a punto del metodo di preparazione per ridurre il numero di layers presenti nell'RGO.

Per valutare le caratteristiche elettrochimiche dei materiali a base di $LiFePO_4$ descritti nell'Obiettivo A, l'ENEA li ha trasformati in elettrodi per la realizzazione di batterie al litio [Report RdS/2012/240]. Per valutare la capacità a basso rate di scarica, gli elettrodi sono stati inseriti in due celle al litio e ciclati galvanostatica-mente a C/10. Per valutare la scarica a differente rate, dopo i 10 cicli di carica e scarica, le celle sono state ciclate con la seguenti procedure: carica galvanostatica a C rate fino a 4,2 V seguita da carica potenziostatica a 4,2 V finché la corrente è scesa sotto C/10. Scariche galvanostatiche fino a 2,0 V a C/10, C/5, C, 2C, 3C e 5C. Per valutare la ciclabilità e la ritenzione di capacità, le celle sono state caricate galvanostaticamente a C rate fino a 4,2 V seguita da carica potenziostatica a 4,2 V, finché la corrente è scesa sotto C/10 e scaricate in galvano statica a C/10 seguita da 99 cicli a C rate. Dove non chiaramente specificato la temperatura delle celle è stata mantenuta a 20 °C.

La Figura 41 mostra il risultato della caratterizzazione elettrochimica effettuata a C/10. Come si nota i materiali con le migliori caratteristiche sono quelli preparati con il metodo 3 e 4, che presentano una capacità specifica di 0,096-0,1 Ah/g, mentre il materiale preparato con il metodo 2 ha una capacità di 0,08 Ah/g e quello preparato con il metodo 1 ha una capacità di poco superiore ai 0,05 Ah/g. Anche nel migliore dei casi la capacità si attesta sotto il 60% della capacità teorica. Il fatto che non si riesca a raggiungere il valore di capacità teorico può essere imputato alla presenza di impurezze che abbassano il titolo in $LiFePO_4$ del materiale o a problemi di diffusione all'interno del materiale che ne limitano la accessibilità. Per valutare se la capacità mancante è dovuta ad impurezze contenute nel campione o a scarsa accessibilità del materiale, una delle celle è stata ciclata a differenti temperature. In tal modo si possono accelerare i fenomeni diffusivi che sono responsabili della perdita di capacità per scarsa accessibilità.

Come si osserva dalla Figura 41b, la capacità aumenta con l'aumentare della temperatura ed ad 80 °C raggiunge i 0,128 Ah/g. Come conseguenza si può affermare che il prodotto è puro almeno al 75% e che almeno per un 15% la perdita di capacità è da ascrivere a fenomeni diffusivi.

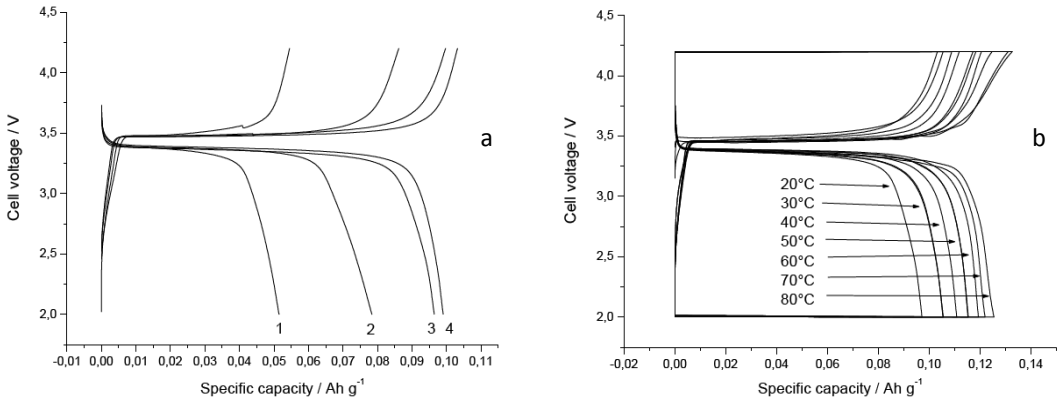


Figura 41. a) Profili di tensione per le celle preparate con FAP proveniente da differenti preparazioni - 1: Precipitazione in fase omogenea - 2: Precipitazione in fase eterogenea da fosfato sodico stechiometrico - 3: Precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico stechiometrico - 4: Precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico sopra stechiometrico. b) Profili di tensione per la cella preparata con FAP proveniente da precipitazione in fase eterogenea da fosfato ammonico stechiometrico a differenti temperature

Gli effetti dei vari parametri di preparazione sono stati analizzati ed ottimizzati, utilizzando le caratterizzazioni elettrochimiche. La Figura 42 dà un esempio dei grafici ottenuti dalle diverse celle realizzate.

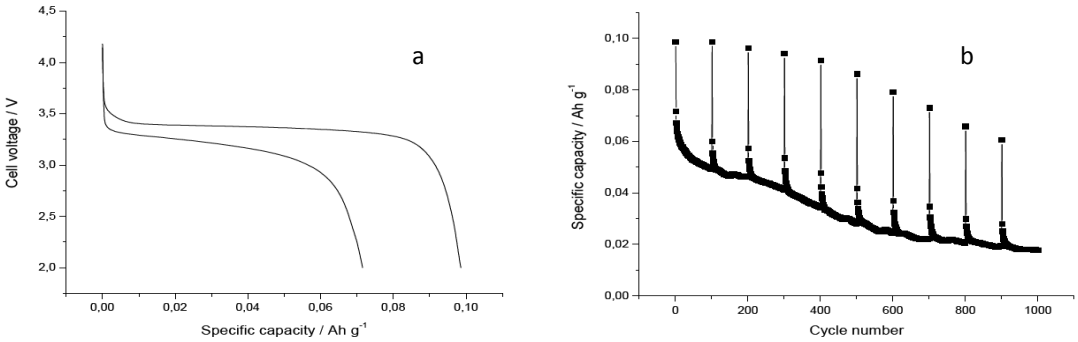


Figura 42. a) Profili di tensione per le celle preparate con FAP proveniente da precipitazione in fase eterogenea da fosfato sodico stechiometrico a differenti rate di scarica . b) Variazione della capacità specifica in funzione del numero di cicli. La cella è stata scaricata a C/10 seguita da 99 cicli a C rate

L'ENEA ha anche progettato il design di cella sviluppato per la realizzazione (in scala di laboratorio) di celle complete litio-ione per applicazioni alle reti elettriche [Report RdS/2012/244]. Nel corso delle attività svolte nel periodo ottobre 2011 - settembre 2012 sono stati utilizzati due differenti design di cella. Il primo, denominato "tipo T", è stato sviluppato nel precedente periodo di attività ed è stato impiegato per la caratterizzazione elettrochimica dei materiali catodici e anodici (in elettrolita organico convenzionale) sviluppati e selezionati nel corso delle attività relative agli Obiettivi A e B. La tipologia delle celle "T" è generalmente impiegato per elettroliti liquidi (Figura 43), e utilizza un raccordo di tipo idraulico in materiale inerte (polietilene o polipropilene) di tipo "T" dotato di pistoni in acciaio 316 (diametro pari a 1 cm) che agiscono come collettori di corrente.

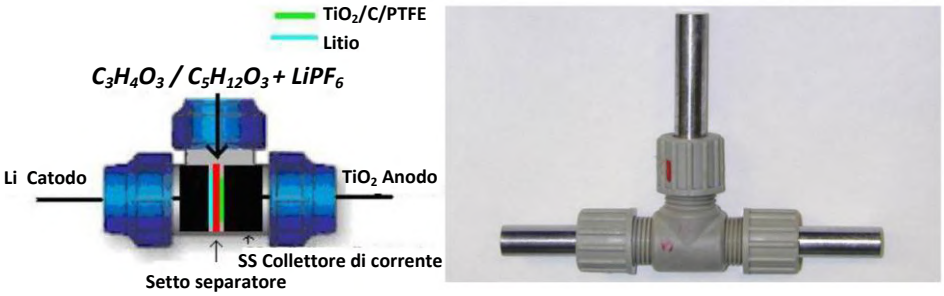


Figura 43. Tipologia di cella a "T" realizzata in polipropilene

Il secondo design di cella è stato appositamente sviluppato per celle complete litio-ione che utilizzano un elettrolita poco volatile ed ininfiammabile (data la presenza di liquidi ionici). Quest'ultima tipologia ha permesso la realizzazione di celle sottili aventi spessore totale attorno 200 µm (inclusi i portacorrente elettrodici). Le celle sono alloggiate in contenitori "soffici" (denominati coffee-bag), impermeabili ad acqua ed aria e aventi bassa densità e, successivamente, sigillate sotto vuoto. La presente tipologia presenta numerosi vantaggi: *i*) elevata sicurezza (ininfiammabilità) della cella; *ii*) assenza di ossigeno (entro la cella) che, come noto, promuove fenomeni di riduzione dell'elettrolita; *iii*) nessuna possibilità di contaminazione con l'esterno; *iv*) adattabilità a diverse geometrie di cella; v) robustezza e flessibilità meccanica della cella; *vi*) aumento energia specifica della batteria dovuto alla diminuzione in peso del contenitore.

Gli elettrodi, aventi forma geometrica rettangolare o quadrata e spessore attorno 40-50 µm, sono depositati su fogli di rame (anodi) o alluminio (catodi) aventi la funzione di portacorrente e spessore pari a 20 µm. Il separatore (avente la funzione di trattenere l'elettrolita), costituito da un foglio in fibra di vetro avente spessore pari a circa 30 µm, viene inserito tra i due elettrodi. Esso presenta analoga geometria ma dimensioni (lunghezza × larghezza) eccedenti 4 mm rispetto quelle degli elettrodi al fine di evitare corto-circuiti interni della cella.

L'elettrolita è una soluzione costituita da un sale di litio (LiTFSI), una miscela di solventi organici (EC e DEC) ed un liquido ionico ($PYR_{13}TFSI$). La quantità di elettrolita (compresa tra 0,2 - 0,3 grammi), addizionato al separatore prima di essere sovrapposto con il secondo elettrodo, è stata calcolata in modo tale da riempire la porosità sia del separatore che degli elettrodi con un eccesso non superiore al 10% in peso.

Il design sviluppato per celle laminate è illustrato in Figura 44 che riporta sia una visione dall'alto (pannello A) che sezione trasversale (pannello B) della cella. Gli spessori dei singoli componenti sono riportati.

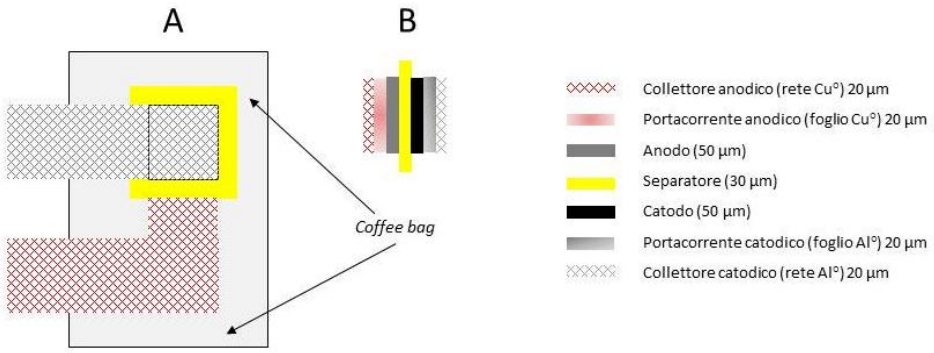


Figura 44. Design di cella sviluppato per celle laminate. Pannello A: visione dall'alto della cella aperta. Pannello B: sezione trasversale. Gli spessori dei singoli componenti sono riportati

L'assemblaggio delle celle litio-ione è stato eseguito all'interno della camera secca ENEA presso il Centro Ricerca della Casaccia. In Figura 45 è riportata una foto di una cella laminata dopo sigillatura sotto vuoto.

Utilizzando il design di cella laminata, è stata effettuata la preparazione di miscele elettrolitiche miste da utilizzare in celle complete litio-ione per applicazioni alle reti elettriche [Report RdS/2012/245]. Le suddette miscele sono costituite da un sale di litio, solventi organici convenzionali e liquidi ionici. La presenza di liquidi ionici come additivi ha lo scopo di diminuire fortemente la volatilità e l'infiammabilità della soluzione elettrolitica evitando, però, di deprimerne la conduzione ionica e la stabilità elettrochimica. Lo scopo è stato quello di realizzare celle litio-ione ad elevata energia e, al contempo, dotate di elevata sicurezza. I liquidi ionici sono stati sintetizzati in ENEA seguendo una procedura originale, opportunamente sviluppata, che ha consentito la preparazione di campioni ad elevata purezza (> 99,9%) ed estremamente anidri (tenore in H_2O < 1 ppm). Il liquido ionico $PYR_{13}TFSI$ è stato selezionato per le sue buone proprietà chimico-fisiche in termini di conduzione ionica e stabilità termica/elettrochimica.

Figura 45. Foto di una cella laminata sotto vuoto

La procedura sviluppata in ENEA è suddivisa in sei stadi distinti e consente di ottenere quantità di liquidi ionici sino a 250 grammi. La purificazione dei liquidi ionici è stata curata in maniera particolare poiché l'utilizzo in batterie al litio richiede materiali ad elevata purezza. I reagenti e prodotti chimici utilizzati sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3. Reagenti e prodotti chimici impiegati nella sintesi dei liquidi ionici

Reagenti e Prodotti chimici	Natura	Provenienza
1-BromoPropano (1-Br-Prop)	Reagente	Aldrich (purezza 99%)
***N*-metilpirrolidina (PYR_1)**	Reagente	Acros (98%)
LiTFSI	Reagente	3M (> 99,.9%)
Etile acetato (EtAc)	Solvente	Aldrich (≥ 99,5%)
H_2O deionizzata	Solvente	(de-ionizzatore)
Carbone attivo	materiale per purificazione	Aldrich
Ossido di alluminio (Al_2O_3)	materiale per purificazione	Aldrich

Sono stati preparati tre differenti set (denominati *A*, *B* e *C*) di soluzioni elettrolitiche miste (Tabella 4). La preparazione degli elettroliti misti è stata condotta all'interno di una camera secca.

L'ENEA ha effettuato infine la caratterizzazione chimico-fisica di miscele elettrolitiche miste da utilizzare in celle complete litio-ione per applicazioni alle reti elettriche [Report RdS/2012/246], in termini di analisi termica, conducibilità ionica, viscosità e densità in funzione sia della temperatura che della composizione molare all'interno di una camera secca ad atmosfera controllata avente un tenore di umidità inferiore a 10 ppm. Inoltre test di infiammabilità sono stati eseguiti al fine di ottenere informazioni, sia pur qualitative, sul comportamento degli elettroliti all'ignizione.

Tabella 4. Composizione molare delle soluzioni elettrolitiche miste preparate

Elettrolita misto	Frazione molare dei singoli componenti		
	LiTFSI	$PYR_{13}TFSI$	EC/DEC
Set *A*			
A1	0,1	0,9	----
A2	0,2	0,8	----
A3	0,3	0,7	----
Set *B*			
B1	0,1	0,8	0,1
B2	0,1	0,7	0,2
B3	0,1	0,6	0,3
B4	0,1	0,4	0,5
B5	0,1	0,2	0,7
B6	0,1	----	0,9
Set *C*			
C1	0,05	0,317	0,633
C2	0,02	0,327	0,653
C3	0,01	0,330	0,660
mmm	0,005	0,332	0,663

A titolo puramente esemplificativo, la Figura 46 mostra la dipendenza della conducibilità ionica delle miscele quaternarie (0,1)LiTFSI-(0,9-*x*)PYR_{13}TFSI-(*x*)EC/DEC in funzione della temperatura (A) e frazione molare del solvente organico EC/DEC (B). I diagrammi conducibilità-temperatura presentano una brusca variazione di pendenza (al di sotto della temperatura ambiente), dovuta alla fusione delle miscele elettrolitiche, che avviene a temperature molto simili rispetto quelle a cui sono evidenziati i picchi endotermici (fusione delle miscele) nelle curve DSC. Questo comportamento denota buon accordo tra le proprietà termiche e quelle di trasporto delle miscele elettrolitiche miste.

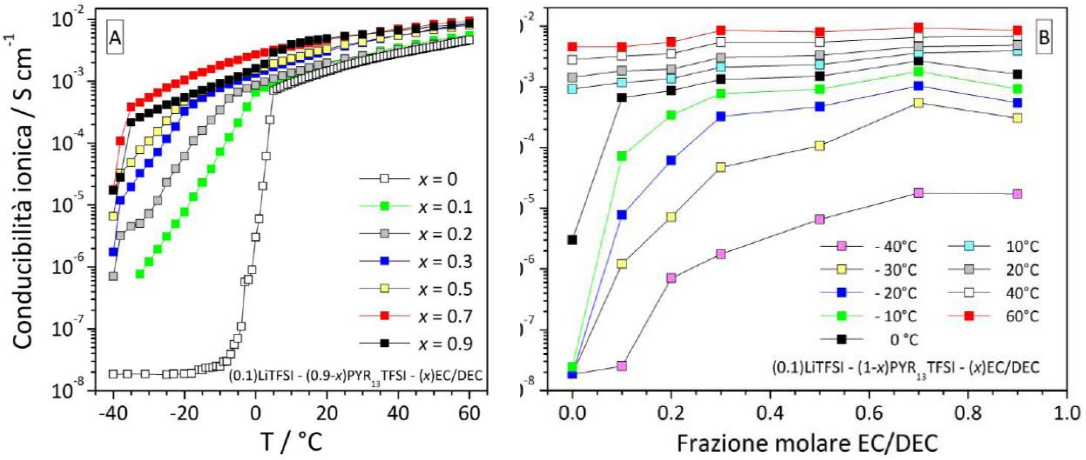


Figura 46. Dipendenza della conducibilità ionica delle miscele quaternarie (0,1)LiTFSI-(0,9-x)PYR13TFSI-(x)EC/DEC in funzione della temperatura (A) e frazione molare del solvente organico EC/DEC (B). Il rapporto in peso EC:DEC è stato fissato pari a 1:1

Per quanto riguarda le misure di infiammabilità, la miscela elettrolitica (0,1)LiTFSI-(0,6)PYR_{13}TFSI-(0,3)EC/DEC, selezionata in base ai risultati ottenuti dalla caratterizzazione chimico-fisica, risulta ottimale anche da un punto di vista della sicurezza in quanto esibisce caratteristiche di non infiammabilità (Figura 47).

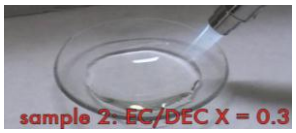
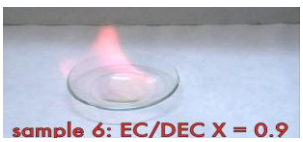
x = 0	Non infiammabile	
x = 0,3	Non infiammabile	
x = 0,4	Infiammabile, ma la fiamma si estingue facilmente	
x = 0,5	Infiammabile, ma la fiamma si estingue facilmente	
x = 0,6	Infiammabile	
x = 0,9	Infiammabile	

Figura 47. Risultati delle prove di infiammabilità eseguite sulle miscele quaternarie (0,1)LiTFSI-(0,9-x)PYR13TFSI-(x)EC/DEC a differente contenuto di solvente organico. Il rapporto in peso EC: DEC è stato fissato pari a 1:1

Ulteriori caratterizzazioni elettrochimiche sono state eseguite su semicelle da laboratorio con controelettrodo in litio metallico [Report RdS/2012/247]. Gli elettrodi in prova sono costituiti dal materiale attivo ($LiFePO_4$ o TiO_2), un conduttore elettronico (carbone Super-P) ed un legante polimerico (PTFE). Il materiale attivo ed il carbone sono stati intimamente miscelati tra loro (in giragiare o mortaio) prima della preparazione degli elettrodi per almeno 40 minuti. Questa procedura consente di ottenere una adeguata ricopertura (*coating*) delle particelle di materiale attivo (aventi dimensioni pari a 1-2 µm) con quelle di carbone (30 nm) al fine di assicurare una buona conduzione elettronica attraverso l'elettrodo. I campioni ed i tipi di prova sono stati numerosi ed, ad esempio, si riporta in Figura 48, l'andamento della capacità di scarica durante i cicli galvanostatici a vari regimi di scarica.

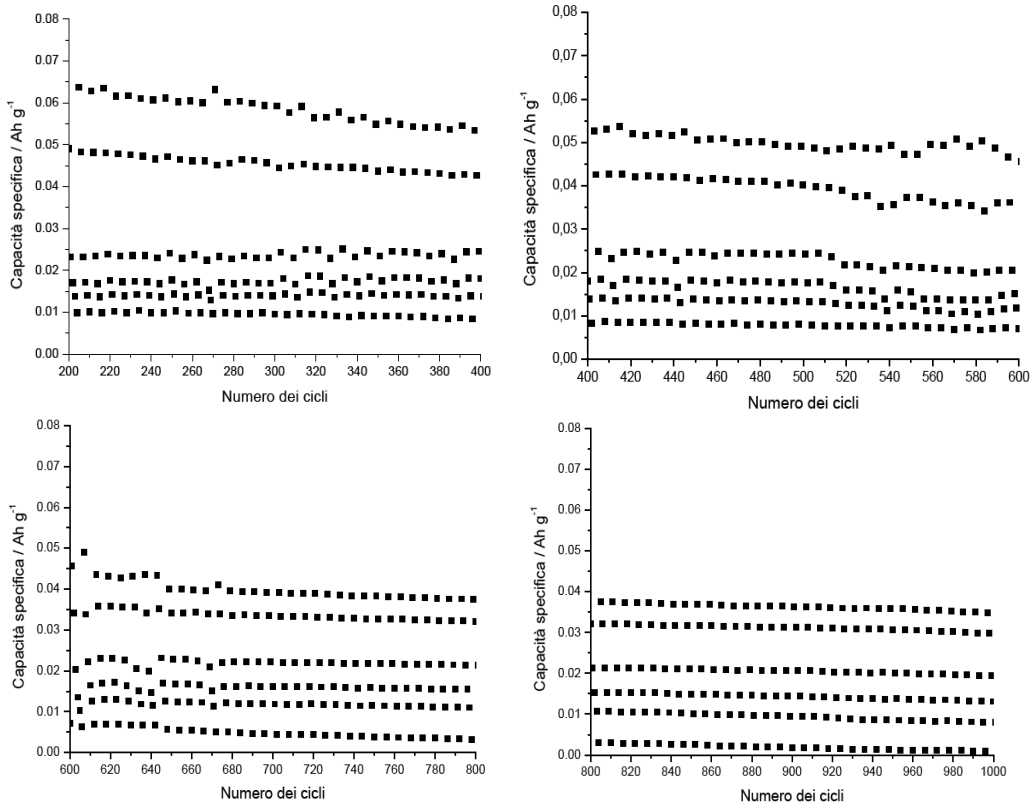


Figura 48. Andamento della capacità specifica in scarica in funzione del numero dei cicli per la cella contenente come elettrolita il LiTFSI in miscela EC/DEC 50:50 + $PYR_{13}TFSI$. Sono rappresentati i cicli successivi (200-1000) per la cella scaricata a C/10, C/5, C, 2C, 3C e 5C

L'ENEA ha anche effettuato una valutazione tecnico economico relativa alla produzione di $LiFePO_4$, considerando il costo di produzione del materiale in funzione del metodo di preparazione. Per fare un paragone con un materiale notoriamente usato come catodo per batterie al litio, è stato calcolato il costo di produzione del $LiCoO_2$.

Per preparare una tonnellata di $LiFePO_4$ (che corrisponde a 6,33 kmoli, MW = 157,8) con uno dei metodi sviluppati dall'ENEA, occorrono le quantità riportate in Tabella 5. La Figura 49 mostra la ripartizione dei costi tra i vari componenti che sono necessari per produrre il materiale prescelto.

Tabella 5. Costi delle materie prime per preparare una ton di $LiFePO_4$ con il metodo B *[Report RdS/2012/240]*

Nome	Costo ($/t) min-max	MW	Rapporto molare	Peso (t)	Costo totale ($/t) min-max
Mono ammonio fosfato	700-840	115	1	0,73	510-610
Solfato ferroso eptaidrato	50-80	278	1	1,76	80-140
Litio idrossido monoidrato	3800-4600	42	1	0,266	1000-1200
Sodio idrossido	400-550	40	2	0,506	200-280

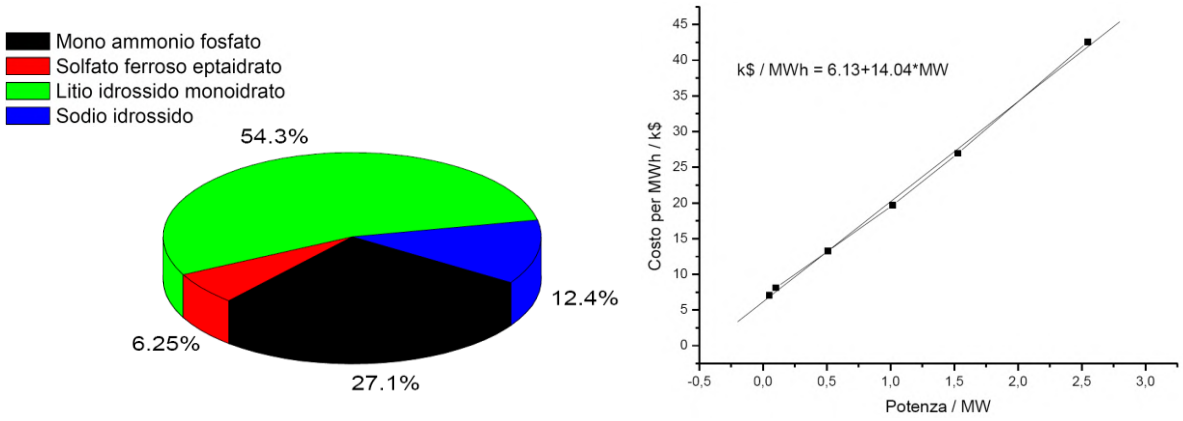


Figura 49. A sinistra: percentuale ripartita dei costi dei vari elementi necessari per la sintesi del materiale catodico con un metodo predefinito. Destra: costo per MWh di energia elettrica accumulata in funzione della potenza erogata

Il costo totale può oscillare tra 1790 e 2230 $ per tonnellata. Com'è facile osservare il costo maggiore è quello del litio idrossido che incide per circa il 54% mentre il fosfato incide per il 27%. Il rimanente è suddiviso tra il costo del ferro (6%) e quello dell'idrossido di sodio (12%). Si ottengono inoltre 0,940 t di solfato di sodio che può essere rivenduto sul mercato ad un prezzo intorno ai 70 $/t con un introito di 65 dollari.

Dai dati elettrochimici si deduce che il materiale così preparato può presentare una capacità di stoccaggio che varia da 300 fino a 60 kWh t^{-1} in funzione della corrente di scarica. La Figura 49 mostra sulla destra il costo in migliaia di dollari per MWh di energia accumulata (valutata per un costo di 2230 $ per tonnellata) in funzione della potenza erogata.

Conclusioni relative alla Linea di Attività "Ricerca fondamentale su batterie a litio"

I risultati ottenuti dall'Università di Bologna con il $LiMnPO_4$ da sintesi sol-gel II sono molto promettenti, anche in considerazione del basso costo della procedura di sintesi, ed evidenziano che è possibile ottenere un'olivina di elevate prestazioni anche senza la coesistenza del ferro, e questo è un vantaggio per l'energia di una batteria grafite/olivina poiché la carica viene rilasciata mediamente a potenziali di circa 4 V. Ulteriori miglioramenti della capacità specifica del $LiMnPO_4$ possono essere previsti ottimizzando la sintesi in termini di purezza dei precursori, come peraltro è successo nel caso del $LiFePO_4$, che dopo notevoli sforzi concentrati sulle procedure di sintesi, raggiunge oggi una capacità di 160 mAh/g, molto vicina a quella teorica. Una batteria con catodo di $LiMnPO_4$, anodo di grafite ed elettrolita convenzionale LP30, che opera a potenziali più elevati di circa 0,5 V rispetto alla corrispondente batteria con catodo di $LiFePO_4$, in base ai valori di capacità raggiunti sarebbe già in grado di fornire 370 Wh/kg (valore riferito alla massa attiva totale), che è un valore confrontabile con quello delle attuali batterie grafite//$LiFePO_4$ e grafite//cobaltite, con il vantaggio però rispetto a quest'ultima di una maggiore compatibilità ambientale e sicurezza per la più elevata stabilità termica dei fosfati rispetto agli ossidi. Se poi il $LiMnPO_4$ raggiungesse lo stesso valore di capacità specifica del $LiFePO_4$, la batteria potrebbe arrivare ad erogare 450 Wh/kg, valore confrontabile o superiore a quello delle batterie con altri catodi ad alto potenziale in fase di sviluppo, grafite//$LiNi_{0,33}Mn_{0,33}Co_{0,33}O_2$ (390 Wh/kg) e grafite//$LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O_4$ (450 Wh/kg). Inoltre rispetto a quest'ultima, che avendo potenziali operativi di circa 4,9 V richiede l'uso di nuovi elettroliti, la batteria con catodo di $LiMnPO_4$ sarebbe di maggiore interesse in quanto può operare in elettroliti convenzionali.

L'introduzione di Mn da parte Dell'Università di Roma nella struttura olivina, con drogaggi di piccola entità, è stato perseguito per incrementare la conducibilità intrinseca del materiale catodico, mentre, la sostituzione massiccia del ferro(II) della Triphylite con il manganese(II) per ottenere un aumento del potenziale di scarica maggiore di 3,6V, e quindi dell'energia specifica della batteria. Dai risultati possiamo dire che l'aumento del volume di cella sicuramente ha migliorato la cinetica d'intercalazione, mentre l'obiettivo di incrementare il potenziale non è stato raggiunto in quanto si sono formate fasi distinte di $FePO_4$ e $MnPO_4$ e non un'unica fase solida. Si ritiene che lavorando ancora sulla sintesi del materiale con basse quantità di manganese si possano migliorare le prestazioni facendogli raggiungere la capacità teorica.

I risultati dell'Università di Camerino su materiali anodici di nuova generazione confermano che l'approccio utilizzato per la preparazione dei compositi M/RGO ha prodotto risultati promettenti, ma non completamente

ottimizzati in termini di procedure di preparazione. A basse velocità di carica/scarica in pratica tutti gli elettrodi hanno capacità superiori a quelle della grafite. I problemi che richiedono successive ricerche sono essenzialmente legati all'ottimizzazione dei vari processi che portano alla formazione degli strati elettrodici. In sintesi la ricerca di frontiera su questi materiali avviata quest'anno ha permesso l'identificazione delle criticità che richiedono ancora attività di ricerca per la loro soluzione:

- Standardizzazione del processo di preparazione di GO. Il grado di esfoliazione della grafite (numero di layers presenti in ciascun strato) dipende in maniera critica dalle varie fasi della preparazione: (i) tempo e temperatura dei processi di ossidazione; (ii) modalità di separazione del prodotto dalla miscela di reazione; (iii) modalità di riduzione/esfoliazione di GO a RGO. Tutti questi processi devono essere ottimizzati.
- Dalla qualità del GO dipende anche la sua capacità di "ancorare" gli ioni metallici e quindi anche il rapporto carbone/metallo nel prodotto finale.
- Nella quasi generalità dei casi i compositi contengono ossidi. Questo implica una capacità irreversibile al primo ciclo dovuta alla riduzione dell'ossido a metallo. La formazione di ossidi non è evitabile visto lo sviluppo di ossigeno durante la fase di esfoliazione. Tuttavia un'ottimizzazione dello step di cottura in forno in atmosfera riducente potrebbe portare ad una diminuzione del contenuto di ossidi nel composito eliminando tutta o parte della capacità irreversibile legata alla trasformazione M_xO_y a M.
- Tutti gli elettrodi hanno limitazioni di tipo cinetico che determinano polarizzazione e quindi perdita di capacità a velocità di carica/scarica elevate. In genere questo tipo di limitazioni dipende dalla morfologia degli elettrodi e dalle dimensioni delle particelle. Un'ottimizzazione dei processi ed interventi sulla formulazione/preparazione degli strati elettrodici (pressatura/porosità, cambio del tipo di binder) potrebbe migliorare la cinetica dei processi elettrodici.

I risultati ottenuti dall'ENEA sui materiali catodici hanno mostrato che i materiali ottenuti a partire dal FAP (ferro ammonio fosfato) preparato per precipitazione in fase eterogenea da soluzioni stechiometriche o sovra stechiometriche di fosfato di ammonio presentano caratteristiche elettrochimiche superiori rispetto ai materiali ottenuti a partire dal FAP preparato da fase omogenea o per precipitazione in fase eterogenea da fosfato di sodio. Tuttavia, anche nel caso migliore, la capacità specifica era di poco inferiore al 60% rispetto al valore teorico. Le ciclazioni a differenti temperature hanno permesso di constatare che la capacità aumenta con l'aumentare della temperatura. La capacità specifica del materiale ciclato a 80 °C raggiunge i 0,128 Ah/g. Come conseguenza si può affermare che il prodotto è puro almeno al 75% e che almeno per un 15% la perdita di capacità registrata a temperatura ambiente è da ascrivere a fenomeni diffusivi. Il materiale ha una buona capacità, sia quando si aumenta la corrente di scarica sia quando viene sottoposto a ciclazione prolungata. Il materiale è stato in grado di fornire circa il 10% della capacità esibita a C/10 rate quando scaricato al 5C e circa il 60% dopo 1000 cicli veloci. Diminuendo la temperatura di reazione o, per una temperatura fissa, diminuendo il tempo di reazione si nota una diminuzione della cristallinità dei campioni e, conseguentemente, della lunghezza media di diffusione degli elettroni. Parallelamente si nota un aumento della capacità specifica e della ritenzione di capacità in funzione della ciclazione. Il materiale sintetizzato a 550 °C per 1 ora presenta la minore cristallinità e il più piccolo valore di diffusione media degli elettroni. La capacità specifica al primo ciclo di tale materiale era di 110 mAh/g, mentre la capacità di ritenzione dopo 1000 cicli veloci era di quasi il 90% di quella iniziale. L'effetto dell'agente litiante e degli additivi aggiunti durante la sintesi è minimo. L'acetato di litio si è mostrato migliore rispetto all'idrossido o al carbonato, determinando un leggero aumento della capacità specifica. Nonostante le proprietà elettrochimiche dei materiali ottenuti non siano molto elevate (le capacità oscillano tra il 50 ed il 60% del teorico) i materiali possono essere scaricati con potenze comprese tra 50 e 100 kW per kg per tempi di 3-6 ore, riuscendo ad accumulare fino a 330 kWh/kg di energia. In queste condizioni il costo del materiale è sempre inferiore ai 15 k$ MWh^{-1}. Il costo del materiale, a parità di energia accumulata, risulta pertanto circa 5-8 volte inferiore a quello necessario per la sintesi del $LiCoO_2$, materiale attualmente usato come catodo nella tecnologia delle batterie litio ione.

L'ossido di titanio, preparato per via elettrochimica nei laboratori ENEA, è stato confrontato con TiO_2 preparato sia mediante tecnica laser (ENEA) che commerciale. Gli anodi, costituiti dal materiale attivo (TiO_2), un conduttore elettronico (carbone) ed un opportuno legante polimerico (Teflon, PTFE), sono stati preparati mediante miscelazione dei componenti e successiva pressatura. Tale procedura ha consentito di ottenere elettrodi omogenei (in spessore e composizione) aventi proprietà meccaniche molto buone ed adeguata porosità (al fine di garantire sufficiente penetrazione dell'elettrolita liquido).

Infine I risultati ottenuti dall'ENEA da prove in cella di elettroliti misti hanno permesso di identificare la soluzione elettrolitica avente composizione molare (0,1)LiTFSI-(0,6)PYR_{13}TFSI-(0,3)EC/DEC come il miglior compromesso tra elevata conduzione ionica, bassa temperatura di fusione ed elevata sicurezza. L'elettrolita selezionato presenta un'elevata conducibilità, prossima a 10^{-3} S cm^{-1} anche -10°C, che risulta di interesse per applicazioni alle basse

temperature. Al contempo, il suddetto elettrolita non mostra infiammabilità anche durante prolungato contatto con sorgenti di ignizione. Pertanto, la soluzione mista (0,1)LiTFSI-(0,6)PYR_{13}TFSI-(0,3)EC/DEC è stata prescelta come elettrolita per le celle complete litio-ione.

Per quanto riguarda l'analisi tecnica ed economica di materiali catodici a base di $LiFePO_4$ svolta dall'ENEA, si può concludere che, nonostante le proprietà elettrochimiche dei materiali ottenuti non siano molto elevate (le capacità oscillano tra il 50 ed il 60% del teorico), i materiali possono essere scaricati con potenze comprese tra 50 e 100 kW per kg per tempi di 3-5 ore, riuscendo ad accumulare fino a 330 kWh kg^{-1} di energia. In queste condizioni il costo del materiale è sempre inferiore ai 15 k$ MWh^{-1}. Il costo del materiale, a parità di energia accumulata, risulta pertanto circa 5-8 volte inferiore a quello necessario per la sintesi del $LiCoO_2$.

RICERCA FONDAMENTALE SULLE TECNOLOGIE DI CONTROLLO E DI INTERFACCIA CON LA RETE

D. Realizzazione e prova di tecnologie di controllo ed interfaccia del sistema di accumulo in batterie al litio con la rete e con utenze particolari

L'attività prevede la progettazione e realizzazione in scala significativa di tecnologie di controllo e gestione delle interfacce verso la rete con l'esecuzione di prove in condizioni reali, valutandone il dimensionamento per alcune applicazioni di riferimento (ospedali, uffici, condomini, utenze singole, ecc.) e definendo le specifiche per la realizzazione di un impianto sperimentale completo di accumulo e di generazione di energia da fonte rinnovabili. L'obiettivo rimane quello di studiare e sperimentare l'elettronica di gestione e controllo sviluppata e le varie strategie di controllo, in modo da rendere economicamente ed energeticamente conveniente l'integrazione di fonti rinnovabili con sistemi di accumulo nelle reti elettriche. A titolo dimostrativo si prevede la realizzazione di un dispositivo di gestione e controllo da 10-20 kW da provare in laboratorio ed in condizioni reali. In particolare l'attività congiunta di simulazione e sperimentazione e il continuo confronto fra i rispettivi risultati permetteranno di affinare il modello e di guidare l'impostazione dei principali parametri in modo da garantire il funzionamento del sistema elettrico anche nelle situazioni più critiche, ad esempio il funzionamento di una microrete in isola. Sarà necessario determinare le specifiche del sistema di controllo al fine di disaccoppiare i servizi ancillari e permettere la continuità e la buona qualità della fornitura di energia elettrica all'utente, nonché di ottenere una gestione efficiente delle risorse energetiche presenti nel sistema (compresi i sistemi di accumulo) in relazione sia alle richieste dei carichi sia alle esigenze della rete.

Le attività inizialmente previste riguardavano la progettazione esecutiva, la realizzazione e prova di un dispositivo di gestione e controllo da 10-20 kW da provare in laboratorio ed in condizioni reali, queste sono state poi incrementate dalla progettazione con definizione di specifiche di un secondo dispositivo di dimensioni più ridotte. Questo ulteriore sistema elettronico è stato poi fatto realizzare per essere successivamente utilizzato nell'impianto dimostrativo previsto nel Progetto 3.1 "Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi".

Le attività sono state svolte in collaborazione con le Università di Palermo e di Pisa.

L' Università di Palermo si è interessata allo sviluppo dell'elettronica di gestione e delle relative logiche e strategie di controllo delle interfacce verso la rete di sistemi avanzati di accumulo elettrico, al fine di favorire l'integrazione di impianti di generazione locale da fonti rinnovabili nel sistema elettrico nazionale.

Nel corso della prima fase delle attività, a partire dall'analisi e dalla definizione degli obiettivi e delle metodologie di controllo dei sistemi di interfaccia verso la rete di sistemi di accumulo elettrico destinati all'accoppiamento con impianti di generazione da fonte rinnovabile, sono state definite le possibili configurazioni del sistema di interfaccia, le specifiche tecniche di tutti i componenti del sistema, l'insieme delle funzionalità del dispositivo e la loro implementazione nelle relative logiche di controllo, prevedendo la possibilità di operare sia in base a logiche di controllo locale, sia in risposta a segnali di controllo da remoto, provenienti dal gestore della rete di distribuzione. Nel corso della seconda fase delle attività, a partire dal lavoro di definizione delle specifiche tecniche di tutti i componenti, e dell'insieme delle funzionalità del dispositivo in progetto, si è proceduto alla progettazione esecutiva del dispositivo, nonché alla realizzazione di un prototipo che è stato poi sottoposto a verifica sperimentale in condizioni simulate e reali.

Le attività sono state condotte in sinergia con il personale tecnico di ENEA e con la collaborazione dell'azienda *Layer Electronics s.r.l.* di Erice.

L'Università di Pisa ha preparato la redazione di specifiche per la realizzazione in scala significativa, 20-30 kW, di dispositivi inverter-accumulatori al litio in grado di interfacciarsi in maniera attiva verso la rete di distribuzione in

corrente alternata e di alimentare su richiesta la carica degli accumulatori di bordo di veicoli elettrici sia per il trasporto pubblico che per quello privato, attraverso un secondo convertitore la cui progettazione esula dal presente accordo. Il dispositivo si presenta quindi come una stazione di ricarica "intelligente" in grado di dialogare sia con la rete di distribuzione, per fornire servizi di potenza e di regolazione della tensione, sia con i veicoli in ricarica per gestire la potenza trasferita in relazione al tempo di sosta disponibile ed alla capability della rete di distribuzione. Sono state poi svolte prove di verifiche funzionali di un dispositivo con caratteristiche analoghe a quello progettato. Le attività svolte si collegano a quelle previste nel Progetto 3.1, dove il dispositivo è stato fatto realizzare sulle base delle specifiche prodotte in questo obiettivo e reso disponibile per un impianto dimostrativo in fase di realizzazione presso il Centro Casaccia dell'ENEA.

Principali risultati

L'Università di Palermo con ENEA ha effettuato una progettazione dettagliata definendo gli obiettivi e le metodologie di controllo dei sistemi di interfaccia verso la rete di sistemi di accumulo elettrico destinati all'accoppiamento con impianti di generazione da fonte rinnovabile, definendo le possibili configurazioni del sistema di interfaccia, le specifiche tecniche di tutti i componenti del sistema, l'insieme delle funzionalità del dispositivo e la loro implementazione nelle relative logiche di controllo, prevedendo la possibilità di operare sia in base a logiche di controllo locale, sia in risposta a segnali di controllo da remoto, provenienti dal gestore della rete di distribuzione. Queste valutazioni sono state fatte tenendo conto dei risultati delle attività svolte nell'anno precedente e delle caratteristiche del sistema sperimentale di riferimento [Report RdS/2012/248].

In particolare:

- è stato presentato lo stato dell'arte sui dispositivi di compensazione dei disturbi impiegati nelle reti elettriche e sui carichi, alla base del lavoro svolto;
- sono state chiaramente definite le specifiche per i sistemi di interfaccia con la rete pubblica BT del distributore che devono essere soddisfatte;
- sono state chiaramente definite le specifiche del dispositivo in progetto;
- è stato definito un algoritmo di ottimizzazione da implementare per il controllo del dispositivo.

Rispetto ai tradizionali gruppi di continuità, tali dispositivi offrono sia una riduzione dell'impatto dei carichi disturbanti sul sistema elettrico, sia una mitigazione dei disturbi di rete nei confronti di carichi particolarmente sensibili.

Le funzioni realizzabili da un dispositivo *Custom Power* dipendono sia dalla configurazione dell'elettronica di potenza, sia dalla logica di controllo adottata, e possono essere ricondotte a:

- riduzione dell'impatto che i carichi disturbanti hanno sulla rete elettrica (compensazione del reattivo, compensazione di armoniche, squilibri, *flicker*);
- mitigazione dei buchi di tensione, interruzioni, squilibri, tensioni distorte, nei confronti di carichi particolarmente sensibili;
- compensazione delle variazioni rapide di potenza attiva (*peak–shaving*), nel caso in cui al dispositivo di conversione sia associata una sorgente di accumulo;
- accoppiamento con fonti di generazione distribuita, per un miglior utilizzo dell'energia;
- regolazione della tensione su lunghe linee o su aree poco magliate di reti di distribuzione.

A seconda della configurazione adottata, spesso uno stesso dispositivo *custom power* è in grado di realizzare diverse funzioni contemporaneamente. Sono stati quindi presi in esame le diverse tipologie di dispositivi *custom power* utilizzate per la compensazione di disturbi nelle reti elettriche e sui carichi.

È stata pertanto condotta una completa indagine sui dispositivi di compensazione dei disturbi impiegati nelle reti elettriche e sui carichi, evidenziandone gli aspetti costruttivi ed i possibili vantaggi e svantaggi.

La panoramica ha riguardato le diverse tipologie di dispositivi:

- Distribution STATCOM (D-STATCOM)
- Dynamic Voltage Restorer (DVR)
- Step Dynamic Voltage Restorer (S-DVR)
- Static Circuit Breaker e Static Transfer Switch (SCB e STS)
- Unified Power Flow Controller (UPFC)
- D-STATCOM + SCB
- Dispositivo derivato con reattanza serie di disaccoppiamento.

I dispositivi destinati alla mitigazione dei disturbi su carichi sensibili devono essere in grado di operare come sorgente di tensione, compensando la distorsione della forma d'onda della tensione della rete di alimentazione,

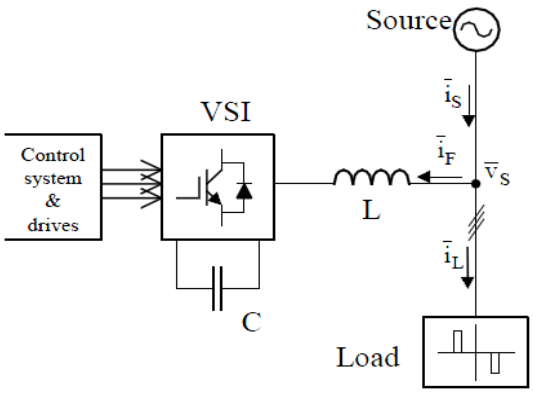


Figura 50. Connessione in derivazione di un dispositivo custom power

come evidenziato in Figura 50 (esempio di dispositivi destinati alla mitigazione dei disturbi su carichi sensibili). In questa struttura, l'inverter, opportunamente controllato in corrente, è chiamato a regolare la corrente ai capi dell'avvolgimento del trasformatore.

Attualmente questi dispositivi vengono principalmente utilizzati per applicazioni "puntuali" mirate per lo più a proteggere utenze particolarmente sensibili. La scelta se installare o meno tali dispositivi discende essenzialmente da valutazioni economiche costi-benefici, fortemente legate alla tipologia del processo produttivo ed al costo associato ad una eventuale sua perdita.

A conclusione di questa panoramica sui dispositivi *custom power*, la Tabella 6 riporta le diverse funzioni realizzabili dai vari dispositivi, insieme alla tipologia di schema di inserzione, al *range* di potenza ed al livello di tensione.

Tabella 6. Funzioni realizzabili dai dispositivi custom power presi in esame

	Buchi di tensione	Interruz.	Regolaz. P (peak shaving)	Regolaz. Q e cosϕ	Comp. Armon. I_carico	Comp. Armon V_rete	Comp. flicker	Livello tensione	Range di potenza	Schema di inserz.
D-STATCOM	No	No	Si	Si	°	No	Si	MT eBT	Decine di MVA	Parallelo
DVR	Si	No	No	No	No	°	No	MT e BT	Decine di MVA	Serie
S-DVR	Si	No	No	No	No	No	No	MT e BT	Decine di MVA	Serie
STATIC TRASFER SWITCH	Si	Si	No	No	No	No	No	MT e BT	Decine di MVA	Serie
UPFC	Si	No	No	Si	°	°	Si	MT e BT	Pochi MVA	serie/ parallelo
D-STATCOM + STATIC SWITCH	Si	Si	Si	Si	°	No	Si	MT e BT	Decine di MVA	serie/ parallelo
Disp. derivato con reattanza di diaccoppiamento	Si	No	Si	Si	°	No	Si	MT e BT	Decine di MVA	serie/ parallelo

Successivamente sono stati esaminati gli schemi per la connessione di utenti attivi alle reti elettriche di distribuzione in BT, in accordo a quanto prescritto dalle normative vigenti, esplicitando le caratteristiche tecniche e le soglie per ciascuno dei dispositivi di protezione previsti.

Lo schema generale per la connessione degli impianti di produzione alla rete BT del distributore è indicato nella Figura 51.

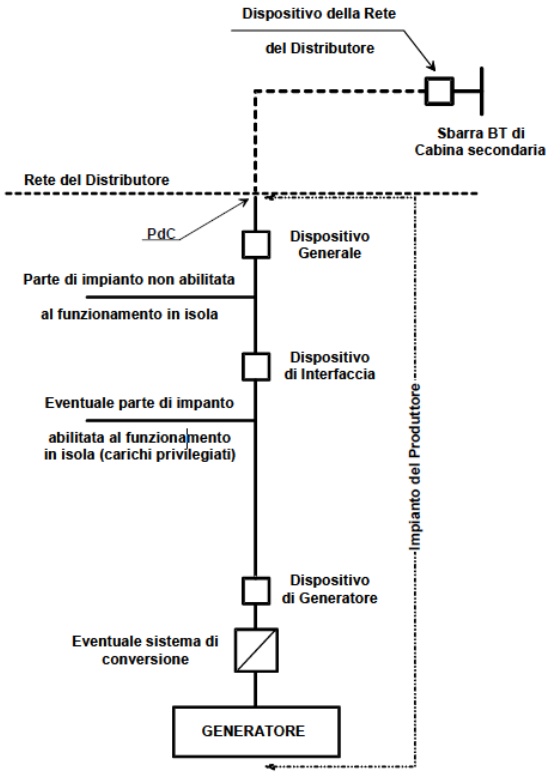


Figura 51. Schema di connessione degli impianti di produzione alla rete BT del distributore (fonte CEI 0-21)

Si è infine passati alla progettazione del sistema di interfaccia previsto, destinato ad interconnettere un impianto di generazione da FER, un sistema di accumulo, un carico e la rete elettrica di distribuzione, secondo lo schema a blocchi di principio evidenziato in Figura 52.

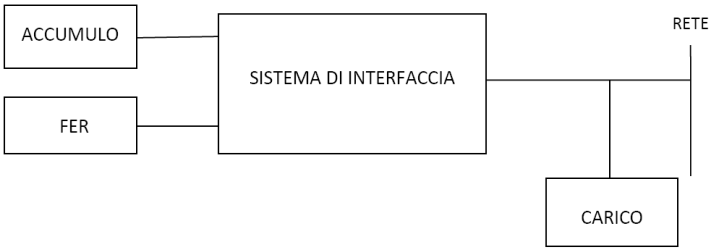


Figura 52. Schema a blocchi di principio del sistema di combinato accumulo-FER

Per la definizione della configurazione del sistema di interfaccia sono state esaminate e confrontate fra di loro due diverse architetture, denominate configurazione parallelo e configurazione serie. La principale differenza tra le due configurazioni risiede nella posizione del regolatore di carica della batteria (convertitore DC/DC #1). Infatti, mentre nella configurazione "parallelo" il regolatore di carica è posizionato a monte del punto di connessione della batteria al bus in DC (in serie cioè al dispositivo di accumulo), nella configurazione serie il regolatore è posizionato in serie al convertitore DC/AC.

In relazione alle specifiche funzionali del sistema si è ritenuto di scegliere, per il sistema, la configurazione parallelo.

Per quanto riguarda il sistema di accumulo, è stato scelto un pacco batterie al litio della *Alchemy Italia srl*, il cui elemento base è costituito da una batteria al litio-ferro-fosfato $LiFePO_4$. Tale tecnologia, rispetto alle tradizionali batterie al litio all'ossido di cobalto ($LiCoO_2$), presenta una maggiore resistenza termica, una maggiore resistenza all'invecchiamento ed una più alta corrente di picco. Inoltre, l'utilizzo del ferro che, al contrario del cobalto, non ha problemi di smaltimento, conferisce un minore impatto ambientale ed un grado di sicurezza più elevato.

Le principali specifiche tecniche relative alla cella $LiFePO_4$ utilizzata, sono le seguenti:

- Modello: ALCH.F20-225150010
- Tipologia: litio-ferro-fosfato
- Capacità nominale: 20 Ah (condizioni di scarica CC/CV - 0,5 C)
- Tensione nominale: 3,2 V
- Resistenza interna: ≤ 3 mΩ
- Tensione massima di carica: 3,65 V
- Tensione minima di scarica: 2 V
- Massima corrente impulsiva di scarica: 100 A per 8 secondi (corrispondente ad una corrente di 5C, misurata ad una temperatura ambiente di 25%)
- Condizioni di carica standard: 0,5 C (CC/CV a 25 °C)
- Condizioni di carica veloce: 1 C (CC/CV a 25 °C)
- Condizioni di scarica standard: 0,5 C (CC a 25 °C)
- Condizioni di scarica veloce: 2 C (CC a 25 °C)
- Bilanciamento delle tensioni di cella: BMS passivo
- Peso della batteria: 535 g
- Volume della batteria: 225 x 150 x 10 mm.

Con riferimento al sistema di bilanciamento (BMS) per il pacco batterie al litio, è stata esaminata la possibilità di utilizzare sia BMS passivi che attivi. Come è noto, nel caso del bilanciamento passivo, il circuito esterno è di tipo resistivo e viene utilizzato per livellare la distribuzione dei valori dello stato di carica delle varie celle all'interno del sistema batterie, dissipando l'energia in eccesso su resistori connessi in parallelo ad ogni singola cella. Nel caso del bilanciamento attivo, il circuito esterno viene usato per trasferire l'energia dalle celle più cariche a quelle meno cariche o per caricare selettivamente le celle in funzione del loro stato di carica, senza che vi sia dissipazione di energia su componenti passivi. Per il sistema di batterie al litio si è optato per un sistema BMS di tipo passivo. La configurazione del pacco batterie prevede l'impiego di N. 250 celle, connesse a due a due in parallelo, per un totale di 125 batterie connesse in serie, con una tensione nominale complessiva di 400 V.

Sono stati poi progettati il convertitore DC/DC # 1 ed il convertitore DC/DC # 2. Il primo convertitore trasferisce potenza dal pacco batterie al *DC-link*, e può funzionare sia in modalità *step-up* che *step-down*, a seconda del verso del flusso di energia. La sua principale funzione è quella di mantenere la tensione lato *DC-link* prossima al valore nominale di 800 V e di garantire l'immissione della corrente variabile prodotta dal generatore FV. Inoltre, esso controlla il valore della corrente di carica e scarica del pacco batterie e stabilisce gli istanti di carica e scarica sulla base di segnali esterni (provenienti dal controllore Micro TI).

Il convertitore DC/AC #2 ha uno schema circuitale da cui si evince la presenza di un ponte ad "H" costituito da 6 IGBT. Ciascuna coppia di IGBT longitudinale (gamba del ponte) viene pilotata da un circuito "*driver*", che svolge anche la funzione di adattare i livelli logici dei circuiti di controllo a quelli idonei a pilotare uno stadio di potenza. Tali segnali di pilotaggio vengono generati dal circuito stampato denominato "MDL 2012", il quale costituisce il modulatore del convertitore. Infine, la piastra denominata "CTR 2012" rappresenta la scheda madre dell'apparecchiatura, dove risiede il microcontrollore TI, ovvero la circuiteria di controllo che governa la modalità di funzionamento adottata, regola le grandezze elettriche di uscita, monitora le grandezze d'ingresso, ecc. Infine lo schema comprende anche un filtro passa-basso LC trifase, del secondo ordine, necessario per il filtraggio delle armoniche dovute alla commutazione e per impedirne la loro immissione in rete.

È stato poi definito il sistema principale di controllo del dispositivo. Infine l'unità di controllo DDI/SMART GRID: il lavoro ha previsto la realizzazione e l'implementazione di un nuovo sistema di protezione di interfaccia (SPI) conforme alle prescrizioni normative vigenti.

Il sistema provvede all'acquisizione delle misure di tensione, corrente e frequenza e, sulla base di eventuali comandi inviati dal distributore, modifica le soglie di intervento del dispositivo di apertura e le funzionalità del convertitore di potenza (*inverter*). Inoltre, esso è in grado di operare lo sgancio del dispositivo di protezione e dell'eventuale rincalzo. La comunicazione con il distributore può avvenire o mediante la *PLC (Power Line Communication) o via Ethernet*. La comunicazione con l'inverter avviene mediante protocollo seriale *RS232*. Il dispositivo include anche una scheda di trasduzione ed acquisizione delle grandezze elettriche in esame.

Uno schema a blocchi semplificato dell'interfaccia di comunicazione è mostrato in Figura 53.

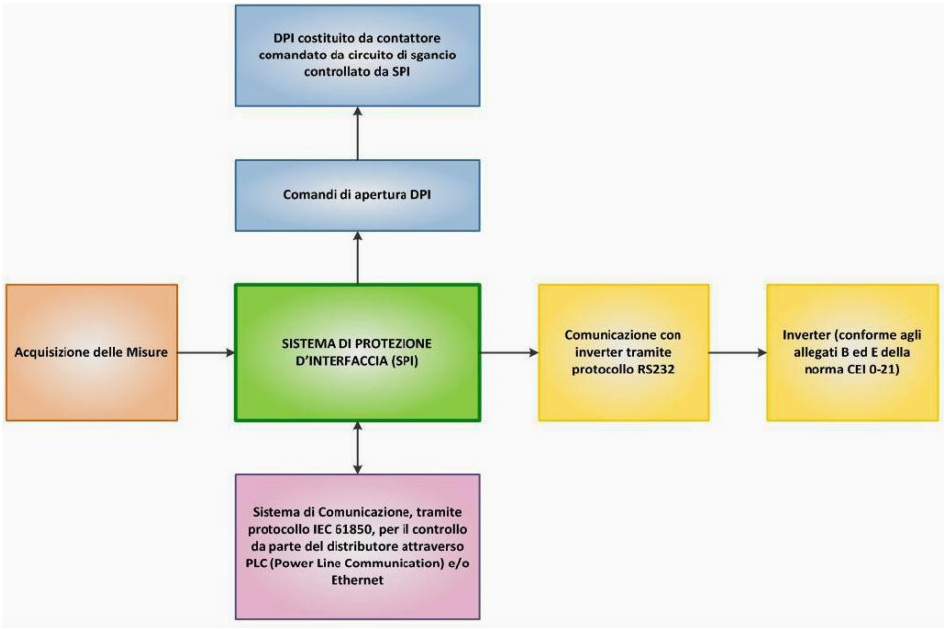


Figura 53. Schema a blocchi semplificato dell'interfaccia di comunicazione DDI/SMART GRID

Il sistema di interfaccia e controllo è stato progettato in modo da:

- rispondere ai requisiti previsti dalle più recenti normative per la connessione di impianti elettrici alla rete di bassa tensione (in particolare la Norma CEI 0-21);
- implementare funzionalità aggiuntive per la gestione avanzata di sistemi combinati accumulo/FER.

Il dispositivo realizzato è in grado di rispondere sia a segnali di controllo locale, sia a segnali di controllo da remoto (per rispondere a segnali di rete e implementare azioni di DSM).

Nello specifico, le funzioni che il sistema è in grado di espletare sono:

- limitazione degli squilibri di potenza tra le fasi;
- condizioni di connessione, riconnessione ed erogazione graduale della potenza;
- limitazione della componente continua della correte I_{dc} immessa in rete;
- regolazione della potenza reattiva ai fini della partecipazione al controllo della tensione, sia secondo logiche locali che da remoto;
- insensibilità agli abbassamenti di tensione (LVFRT);
- limitazione della potenza attiva generata;
- funzionamento in isola per carichi privilegiati;
- compensazione delle armoniche di corrente;
- funzionamento secondo logiche di *peak shaving* o *load shifting*, allo scopo di massimizzare il beneficio economico per l'utente finale.

Per individuare una strategia di gestione ottimale del sistema di accumulo, in presenza di impianti alimentati da fonti rinnovabili, è innanzitutto necessario valutare gli effetti che la variabilità della generazione rinnovabile ha sulla gestione del carico elettrico nel suo complesso. Il modo più immediato per comprendere l'impatto della generazione da fonti rinnovabili sulla rete elettrica è quello di considerare la stessa non come "aumento della generazione disponibile", bensì come "riduzione del carico" nel sistema elettrico. In tal modo, è stato poi definito un algoritmo ottimale di controllo ed ottimizzazione del sistema di accumulo.

Nel corso della seconda fase delle attività [Report RdS/2012/305], a partire dal lavoro di definizione delle specifiche tecniche di tutti i componenti, e dell'insieme delle funzionalità del dispositivo in progetto, si è proceduto alla progettazione esecutiva del dispositivo, nonché alla realizzazione di un prototipo.

E' stata infine condotta una campagna di test e prove al fine di:

- applicare e validare in ambiente simulato l'algoritmo di gestione del sistema combinato per profili di variabilità della domanda tipici di alcune utenze di media taglia del settore terziario;
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) il regolare funzionamento dei singoli componenti di potenza del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento (in

modalità *stand-alone* e *grid-connected*);

- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione (verso la rete) implementate.

La Figura 54 mostra un particolare dell'ingresso in corrente continua dal pacco batterie dello schema elettrico esecutivo del dispositivo.

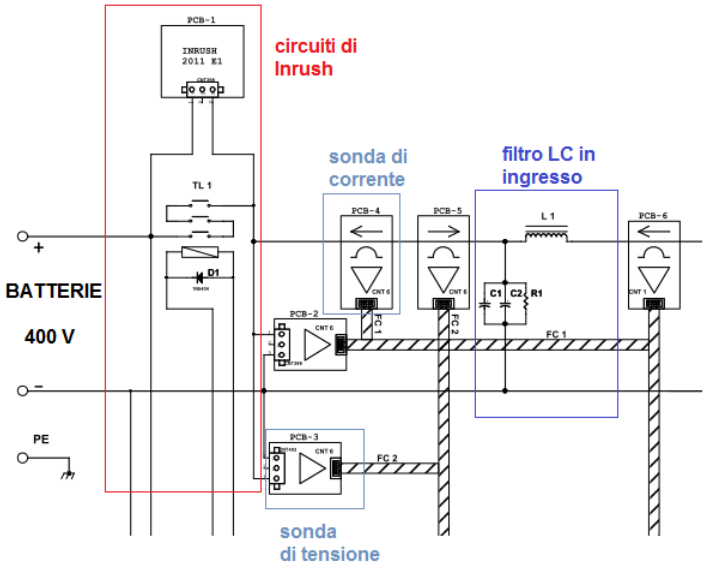


Figura 54. Particolare della sezione di ingresso del dispositivo

La tensione nominale di ingresso dal pacco batterie è pari a 400V. Sono accettabili valori di tensione compresi tra 350V e 450V. Sono ottimali tutti i valori di tensione compresi tra 390V e 410V.

In Figura 55 è rappresentato il convertitore DC/DC (convertitore #1) che provvede a trasferire potenza dal pacco batterie al successivo DC-link, in condizioni di bidirezionalità. Il convertitore è costituito da una coppia di IGBT longitudinale (gamba del ponte) che viene pilotata attraverso un circuito "driver" dai segnali generati dal modulatore del convertitore (circuito stampato denominato "MDL 2012").

Gli IGBT utilizzati sono il modello SKM 100GB128D della ditta SEMIKRON.

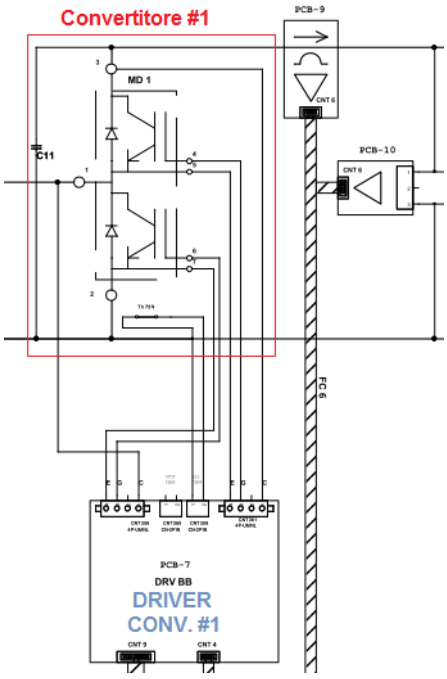


Figura 55. Particolare dello schema esecutivo con il convertitore #1 ed il relativo driver

In Figura 56 è rappresentato il convertitore DC/AC bidirezionale (convertitore #2) che provvede a trasferire potenza dal DC-link alla rete in AC (o al carico privilegiato, in modalità di funzionamento stand-alone) o viceversa.

In figura è evidenziato il ponte ad "H" costituito da 6 IGBT (3 gambe) identici a quelli utilizzati nel convertitore #1. Si notano i tre distinti driver delle tre gambe del ponte pilotati dal modulatore del convertitore (circuito stampato "MDL 2012").

Inoltre si nota il filtro LC del DC-LINK realizzato con n.8 condensatori della Keindel da 2,2 mF ciascuno, collegati in serie e parallelo in moda da ottenere una capacità complessiva di 4,4 mF.

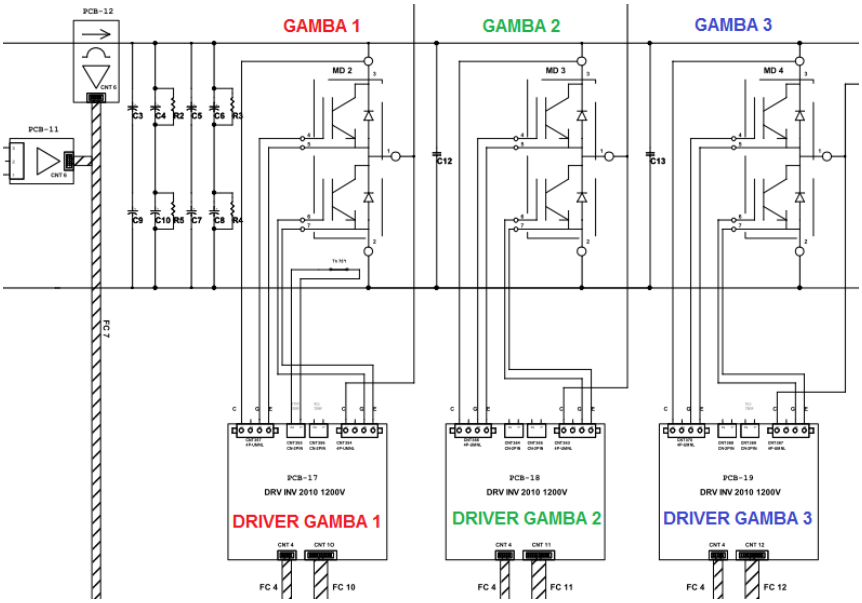


Figura 56. Particolare dello schema esecutivo con il convertitore #2 ed i relativi driver

La fase di sviluppo sperimentale ha riguardato la realizzazione prototipale del sistema di controllo ed interfaccia ibrido del sistema combinato accumulo/FER.

In Figura 57 è mostrato l'intero blocco di potenza, costituito dai convertitori #1 e #2, all'interno del quale è possibile visualizzare lo stadio di potenza, le schede di controllo dei convertitori, i condensatori ed induttori, l'alimentatore ausiliario, il display LCD e la morsettiera di collegamento.

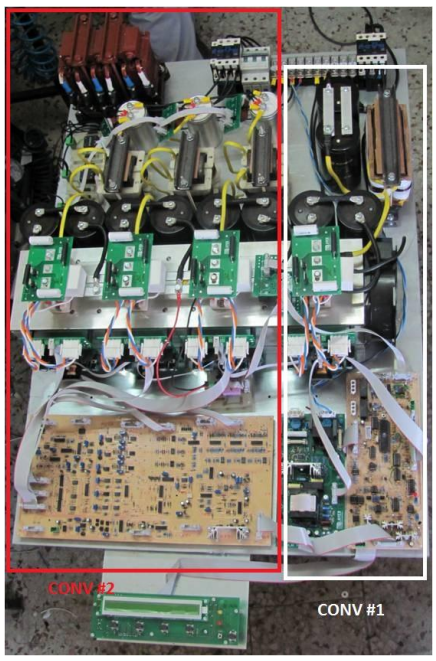


Figura 57. Visione d'insieme dettagliata dell'intero blocco di potenza

Il DDI è stato realizzato utilizzando schede di sviluppo di costruzione *STMicroelectronics*. Lo schema a blocchi per la realizzazione dell'hardware è mostrato in Figura 58, in cui è possibile notare come l'hardware viene scomposto in una sezione metrologica e in una sezione di elaborazione e trasmissione dati.

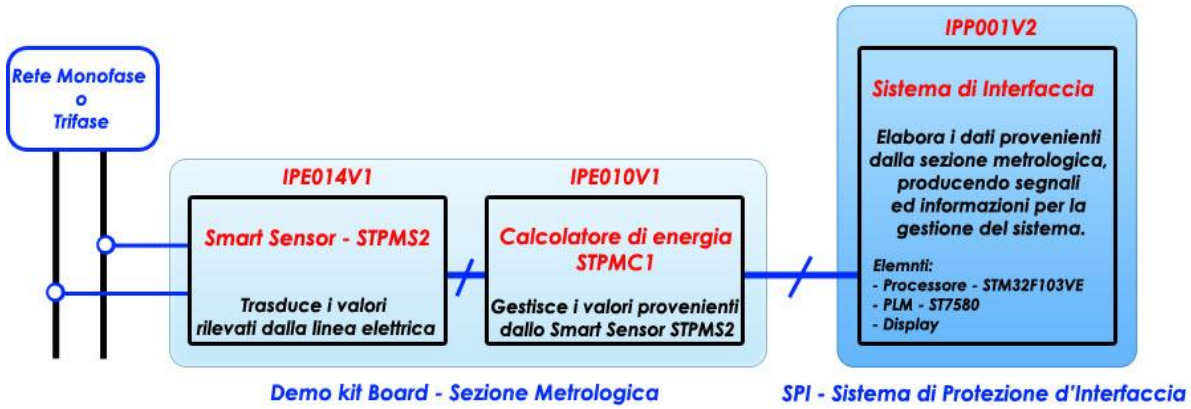


Figura 58. Schematizzazione dell'hardware del DDI

Andando nel dettaglio dell'hardware, le *board STMicroelectronics* (mostrate in Figura 59), che sono state utilizzate per il progetto, sono le seguenti:

- *Demo Kit Board*. (sezione metrologica) È composta dalle schede STEVAL-IPE014V1 e STEVAL-IPE010V1, le cui funzioni sono rispettivamente la trasduzione dei segnali da misurare attraverso lo *Smart Sensor* STPMS2 e l'elaborazione e la memorizzazione dei segnali provenienti dal trasduttore tramite il calcolatore di energia STPMC1.
- *E-meter board.* Costituita dalla scheda STEVAL-IPP001V2 che si interfaccia con l'impianto di generazione da FER svolgendo le funzioni di gestione e controllo del medesimo, manipolando i dati provenienti dalla sezione metrologica. La scheda è stata progettata per includere funzionalità avanzate e per soddisfare i requisiti di prossima generazione per le misure di energia, ed è possibile avere caratteristiche supplementari inserendo dei moduli extra per una completa personalizzazione e riprogrammando in modo opportuno il software residente in memoria.

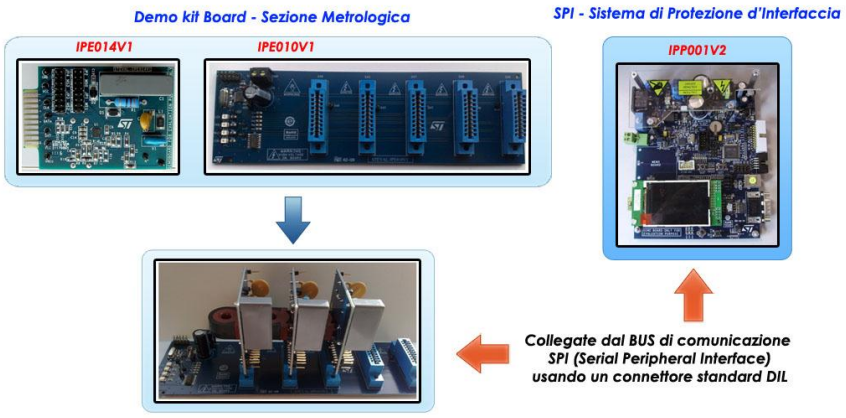


Figura 59. Foto dei componenti hardware utilizzati

Il *firmware* è stato sviluppato in modo da implementare le seguenti funzionalità:

- protezione di massima e minima tensione con due soglie;
- protezione di massima e minima frequenza con due soglie;
- gestione dello sgancio del dispositivo;
- gestione della comunicazione con il distributore via power line ed ethernet;
- gestione dell'inverter via RS 232.

L'ambiente di sviluppo utilizzato per l'implementazione del *firmware* per la realizzazione del *DPI* è *Atollic TrueSTUDIO®*. La programmazione è stata fatta via JTAG *probes* utilizzando ST-Link/V2 di *STMicroelectronics*.

La descrizione dell'intero schema circuitale e dei vari componenti è disponibile nel Report RdS/2012/305.

Nell'ultima fase delle attività è stata condotta una campagna di test e prove al fine di:

- applicare e validare in ambiente simulato l'algoritmo di gestione del sistema combinato per profili di variabilità della domanda tipici di alcune utenze di media taglia del settore terziario;
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) il regolare funzionamento dei singoli componenti di potenza del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento (in modalità stand-alone e grid-connected);
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione (verso la rete) implementate.

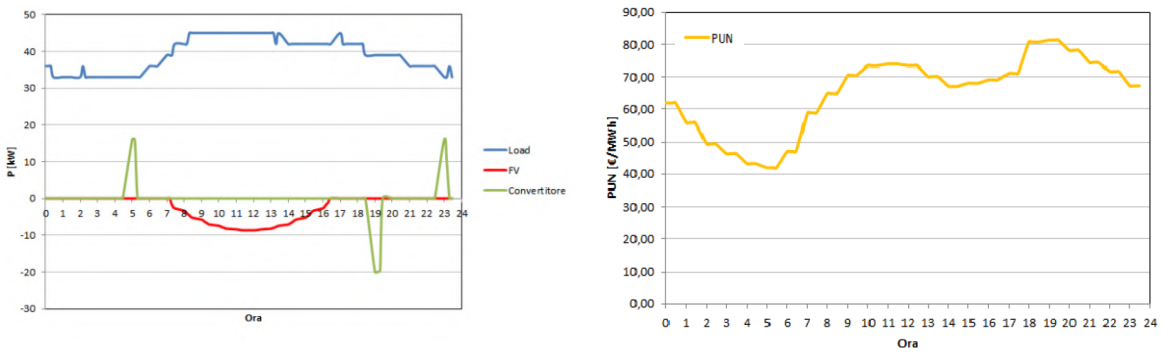


Figura 60. Valori della potenza assorbita dall'utenza ospedaliera, della potenza prodotta dall'impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo invernale

Nella Figura 60, è riportata, per una delle tre utenze simulate e per i due periodi invernale ed estivo, il diagramma rappresentante gli andamenti giornalieri della potenza assorbita dal carico ("Load" linea azzurra), della potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico ("FV" linea rossa) e della potenza erogata e assorbita dal convertitore lato AC ("Convertitore" linea verde).

Figura 61. Campo FV in silicio policristallino utilizzato per la fase di test (campo 1)

Sono state poi svolte prove di laboratorio simulate utilizzando 2 impianti FV pilota: il primo ha un campo FV costituito da moduli in silicio monocristallino, mentre il secondo sfrutta la tecnologia del silicio amorfo a film sottile. Nella Figura 61 è mostrato uno dei campi FV utilizzati per la fase di test.

La fase di test è stata finalizzata a valutare il regolare funzionamento dei singoli componenti del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento. Le prove di seguito elencate sono state eseguite con un sistema di accumulo elettrochimico costituito da 33 batterie al piombo (12 V/100 Ah) collegate in serie, per ottenere una tensione complessiva di 396 V. Le batterie utilizzate sono riportate in Figura 62, in quanto l'arrivo delle batterie al litio ha subìto dei ritardi.

Figura 62. Batteria al piombo usata per i test

I risultati dei test effettuati hanno confermato le prestazioni attese. Ulteriori sviluppi della fase di messa a punto e verifica potranno essere condotti non appena il sistema di accumulo previsto nel progetto (batterie al litio) sarà fisicamente disponibile. Ad esempio, la misura della tensione d'uscita che è di fondamentale importanza in quanto consente di valutare se la forma d'onda in uscita è quella desiderata. Si precisa che il valore della tensione in uscita deve essere lo stesso in presenza di carico oppure a vuoto. Detta misura viene eseguita sia con un analizzatore di rete che con un oscilloscopio.

L'Università di Pisa con ENEA ha definito la specifica di un compensatore statico di collegamento tra una rete in corrente

alternata in bassa tensione e una rete in corrente continua a 600 V, dotato di accumulo elettrochimico e con una potenza nominale dell'inverter di interfaccia pari a 20 kW [Report RdS/2012/249].

Il sistema doveva essere in grado di scambiare con la rete in corrente alternata sia potenza attiva che reattiva e sul lato corrente continua potenza tra diversi dispositivi (per esempio, accumulatore, carica batterie, solare fotovoltaico, ecc.).

Nell'ambito dell'impiego in un'ottica di utenza in bassa tensione, le funzioni da svolgere sono quelle di compensazione di potenza attiva e reattiva, in modo da ottimizzare la gestione delle sorgenti, oltre che di consentire il possibile funzionamento in isola nell'evenienza di una disalimentazione dalla rete di distribuzione e impiegando le risorse disponibili localmente.

Il sistema dovrà comportarsi da generatore di tensione ed essere controllato con una logica con "statismo", come descritto più oltre, in modo da consentirne il funzionamento sia in parallelo alla rete che in isola o in parallelo ad altri generatori. Lo schema di principio è indicato in Figura 63.

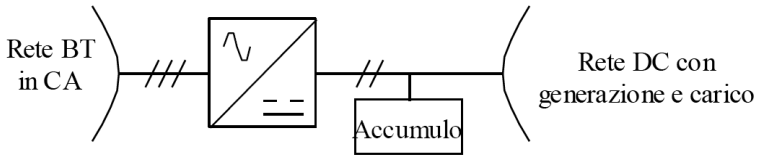


Figura 63. Schema di principio del sistema di interfacciamento con accumulo

Il sistema dovrà essere realizzato con uno schema elettrico e di controllo tali da consentire lo svolgimento delle funzioni menzionate. In linea di principio e salvo diverso accordo tra le parti da redigere in fase di realizzazione, lo schema dovrà essere come indicato in Figura 64.

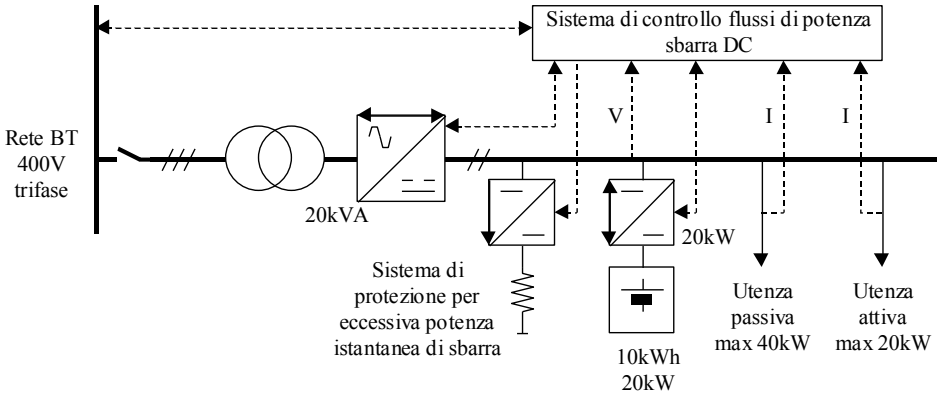


Figura 64. Schema elettrico di massima e collegamenti sistema di controllo.

Il sistema indicato nello schema di principio di Figura 63 deve avere un dispositivo di controllo per la gestione dei flussi di potenza sulla sbarra in corrente continua interfacciato con i convertitori DC-DC dell'accumulo e del sistema di sfioramento passivo, nonché con l'inverter. Il bilanciamento della potenza dovrà essere ottenuto mantenendo costante la tensione sulla sbarra in corrente continua a 600 V. Il sistema di controllo fornirà i set-point di potenza ai dispositivi attuatori secondo una logica da definirsi con il committente. In prima battuta il convertitore DC-DC dell'accumulo controllerà la tensione in DC bilanciando la somma delle potenze scambiate dagli altri dispositivi connessi, i cui punti di lavoro saranno invece definiti dalle proprie esigenze (utenza attiva e passiva) o dal sistema di controllo stesso per quanto riguarda l'inverter di interfacciamento con la rete. Il punto di lavoro dell'inverter sarà definito tenendo conto in particolare dello stato di carica delle batterie e degli eventuali servizi che si volessero erogare verso la rete esterna, in particolare quando si volesse realizzare un'isola sulla rete in alternata.

Le prestazioni in termini di potenza attiva erogabile saranno limitate temporalmente dalle caratteristiche degli accumulatori impiegati e dovranno essere previsti accumulatori con energia nominale alla scarica in un'ora non inferiore a 10 kWh e capaci di erogare una potenza di 20 kW per almeno 15 minuti. Il sistema di conversione deve essere in grado di scambiare continuativamente una potenza di 20 kVA, in modo da poter comunque svolgere le altre funzioni, come ad esempio di compensazione di potenza reattiva, senza alcuna limitazione delle prestazioni.

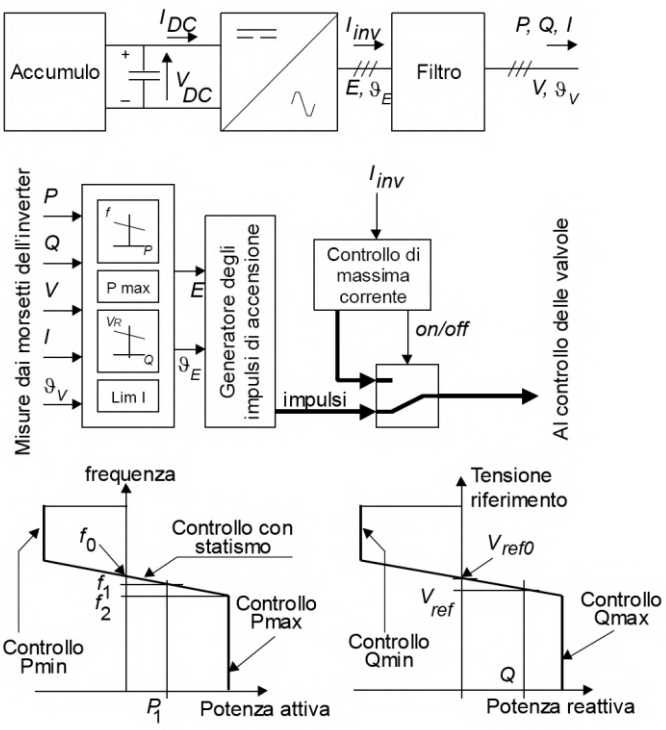


Figura 65. Schema di principio del sistema di regolazione con statismo

La struttura di controllo dell'inverter deve permetterne l'utilizzo sia su rete passiva che attiva secondo varie modalità di funzionamento (Figura 65). Il controllo che dovrà essere implementato nel convertitore dovrà prevedere un grado di *statismo*. Il controllo agisce definendo il modulo e fase della fondamentale della tensione che l'inverter deve produrre sulla base di quattro controllori: di frequenza, di tensione, in limitazione di potenza e in limitazione di corrente. Le uscite sono inviate al generatore degli impulsi di accensione delle valvole che può essere un PWM ma anche essere realizzato con una qualsivoglia altra metodologia.

L'unità di controllo deve essere costituita da un sistema a microprocessore, di tipo DSP, che esegue le funzioni di supervisione e controllo del convertitore statico, il calcolo dei parametri derivati dalle grandezze misurate, la gestione delle anomalie, la gestione degli I/O e dell'interfaccia con l'utente.

Il microprocessore esegue le funzioni di calcolo e di modulazione degli impulsi per i componenti di potenza. La modulazione deve essere del tipo PWM. I segnali di I/O che pervengono alla scheda di controllo devono essere opportunamente condizionati e galvanicamente isolati.

L'unità di controllo deve poter permettere un interfacciamento con la piattaforma multiprocessore veloce: questa caratteristica ha per obiettivo la possibilità di poter pilotare il convertitore statico per seguire richieste di funzionamento ottenute a seguito delle elaborazioni delle misure e dei parametri di linea da parte di un sistema supervisore esterno.

Il sistema di accumulo energetico deve essere di natura elettrochimica. La tecnologia di accumulatore è al litio polimeri. Il sistema di accumulo deve essere costituito da un pacco di moduli accumulatori collegati opportunamente tra di loro. Il rapporto tra la potenza massima erogabile dalle batterie e l'energia nominale alla scarica in un'ora deve essere compresa tra 4 e 8 h^{-1}. L'energia nominale (estraibile alla scarica in un'ora) deve essere non inferiore a 10 kWh. Il sistema deve essere collegato ad una sbarra in corrente continua a 600 V con una opportuna interfaccia DC-DC che possa regolare lo scambio di potenza tra il sistema di accumulo e la sbarra stessa. L'obiettivo del controllo del convertitore DC-DC sarà, in prima battuta, il mantenimento della tensione ad un livello costante realizzando, di fatto, il saldo tra le potenze scambiate dagli altri dispositivi connessi alla sbarra stessa. La gestione dello stato di carica delle batterie dovrà essere effettuato dal sistema di controllo di sbarra agendo sui set-point del controllore con statismo dell'inverter di connessione con la rete AC.

Il sistema deve essere dimensionato in modo da erogare la potenza di 20 kW per almeno 15 minuti e comunque deve essere in grado di erogare 10 kW continuativamente per un'ora.

La tecnologia ipotizzata per il sistema di accumulo è al Litio-Polimeri, per ragioni di ingombro, durata della vita utile e elevato rapporto potenza/energia.

- ✓ Tipologia preferibile: Litio-Polimeri
- ✓ Potenza scaricabile dal pacco per 15 minuti: 20 kW
- ✓ Vita in termini di cicli all'80% di scarica: >2000 cicli
- ✓ Temperatura massima di esercizio: 45 °C
- ✓ Range di umidità di esercizio: 40÷90%

PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE PROTOTIPALE DI SOLUZIONI IMPIANTISTICHE OTTIMIZZATE PER DIVERSE APPLICAZIONI

E. Verifiche sperimentali sull'interazione accumulo-rete

L'attività prevede la progettazione esecutiva e la realizzazione degli impianti necessaria per la cosiddetta"casa attiva". Il progetto dimostrativo si basa sul dimensionamento di riferimento di un sistema integrato di produzione ed accumulo (sia elettrico che termico) adatto a fornire servizi di potenza alla rete e di energia per l'integrazione delle fonti rinnovabili in modo da poter gestire uno scambio programmato della potenza con le reti: il dimensionamento preliminare prevede un appartamento standard di circa 100 m^2 che può usare l'accumulo termico per lo spostamento dei carichi elettrici e quello elettrico (da circa 1 kW and 0,5-1 kWh) per il livellamento delle punte e le interruzioni di media durata con la possibilità di fare il servizio dinamico di stabilità per la rete (15-20 min.). L'attività prevede l'esecuzione di verifiche sperimentali del progetto dimostrativo della casa attiva in cui vengono determinate le prestazioni ed i vantaggi energetici ed economici. In particolare si è previsto di analizzare i comportamenti di sistemi di accumulo, l'interfaccia di gestione e controllo verso la rete e i vantaggi associati all'uso delle fonti rinnovabili. È prevista inoltre l'attività di sperimentazione del dispositivo di interfaccia realizzato nell'Obiettivo D presso un'utenza reale.

Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Pisa.

Principali risultati

Dovendo verificare il comportamento di un sistema di compensazione della potenza attiva e reattiva con accumulo di un impianto per l'alimentazione di un sistema di trasporto o con fonti rinnovabili, come descritto nell'Obiettivo D, è stato scelto di misurare le prestazioni di quello installato nella funicolare di Bergamo "San Vigilio" in accordo con il gestore ATB, in attesa di avere disponibile il sistema similare presso il Centro Casaccia dell'ENEA.

La funicolare di Bergamo "San Vigilio" unisce il Colle di San Vigilio con la Città Alta di Bergamo. Entrata in funzione nel 1912, ha una corsa di 620 m con un dislivello tra le due stazioni di circa 90 m. Il percorso della funicolare è costituito da due tratti a pendenza differente. Il tempo per arrivare da una stazione all'altra è di circa 2 minuti e mezzo e ogni corsa completa di salita e discesa avviene con una cadenza di 15 minuti. Durante l'orario invernale, nei giorni feriali, la funicolare effettua una pausa di 2 ore intorno alle 12:55 e termina il servizio alle ore 20. Nel periodo estivo, invece, viene fatto orario continuato anche nei giorni feriali dalle 10:21 alle 24:00.

Il sistema di trazione è costituito da un motore DC alimentato da un doppio ponte a tiristori. La fornitura dell'energia elettrica è di tipo trifase in bassa tensione a 400 V con un picco di potenza richiesta di 220 kW.

Dall'analisi dei risultati sperimentali relativi al profilo di potenza dell'assorbimento della funicolare che dipende dal numero di passeggeri a bordo della vettura. La campagna di misure ha confermato che questa dipendenza incide per circa il 25% del picco di massima potenza richiesta. La massima potenza registrata nella settimana di acquisizioni è di 200 kW, mentre il valore più basso della corsa in salita, nel tratto a pendenza maggiore, è stato di 150 kW.

Durante l'estate del 2012 sono state apportate modifiche al sistema di monitoraggio delle batterie e sulla soglia di intervento delle stesse. Si è quindi proceduto ad una campagna di misura, per vedere gli effetti di tale modifiche sul piano energetico e di potenza e valutare la funzionalità ed i limiti del sistema di gestione e controllo del sistema di accumulo e di interfaccia verso rete.

In contemporanea alle acquisizioni fatte in loco, c'è stata una campagna di misure fatta da remoto da parte del costruttore dell'impianto (società EEI) in grado di registrare il segnale di stato di carica stimato dal BMS (Battery Management System). Quest'ulteriore serie di misure ha permesso di monitorare lo stato di carica delle batterie.

La Figura 66 mostra l'andamento dello stato di carica della batteria in condizioni di reale funzionamento.

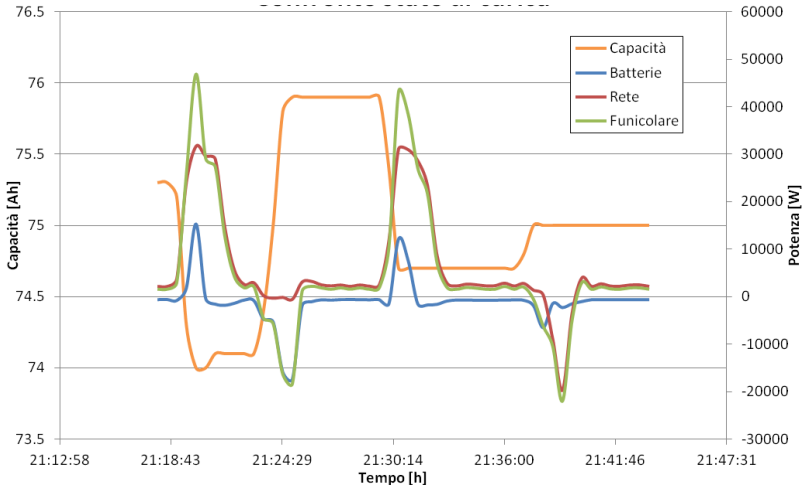


Figura 66. Confronto tra batteria sufficientemente scarica e batteria eccessivamente carica

Quanto emerso dall'analisi delle registrazioni mette in evidenza la necessità di implementare un anello di controllo dello stato di carica degli accumulatori molto più lento di quelli del controllo di potenza e di corrente esistenti, poiché il definire a priori il livello di potenza a cui far intervenire il sistema di compensazione non assicura, nononstante la regolarità delle corse della funicolare, un buon funzionamento energetico dell'impianto. Inoltre, è stato anche dimostrato il vantaggio energetico associato all'introduzione del sistema di accumulo in quanto la variazione del contributo del sistema di compensazione con accumulo è, in termini di energia fornita tra massimo e minimo carico, del 20%, ed analogamente la variazione di energia richiesta dalla rete è dell'11%.

E' stata poi presentata l'analisi e la modellazione del carico di un'abitazione civile, base per il dimensionamento di un sistema di accumulo elettrico e termico [Report RdS/2012/251].

La gestione dei due sistemi di accumulo permette di contenere il profilo del carico dell'utenza su valori ridotti della potenza richiesta dalla rete, con beneficio economico dell'utenza, che può accedere ad un contratto meno oneroso (chiede meno potenza), e del gestore di rete che può evitare il raddoppio delle linee di distribuzione con il sopravvenire di nuove utenze.

E' stata analizzata una soluzione particolare tesa a semplificare l'impianto ed a ridurre i costi di acquisto. La soluzione è stata realizzata presso un'utenza domestica ed è attualmente in esercizio.

Al fine di poter sperimentare sul campo le logiche di gestione messe a punto, è stato scelto un sito dove poter installare tutti i dispositivi necessari all'attività. Il sito scelto è la casa del guardiano dei laboratori dell'Università di Pisa nella sede di San Piero a Grado (PI).

Per dimensionare i componenti del sistema di accumulo è stata svolta una campagna di misure sul sito divisa in due fasi. La sezione di misura corrisponde al punto immediatamente a valle dei dispositivi di protezione delle due linee elettriche che dal quadro generale dei laboratori alimentano la casa: linea luce e linea forza motrice (F.M.).

Il dimensionamento della capacità dell'accumulo elettrico è sviluppato in funzione delle cumulate di potenza del carico che dovrà alimentare. Sono stati quindi costruiti i diagrammi di durata del carico della linea Luce custode, della linea F.M. custode e dell'appartamento inteso nel suo complesso.

Dai grafici di Figura 67 si evince che l'andamento è di tipo esponenziale con pendenza molto ripida. Anche la potenza totale (in verde), ottenuta come somma degli assorbimenti contemporanei nelle due linee, presenta un diagramma di durata del carico con derivata molto alta.

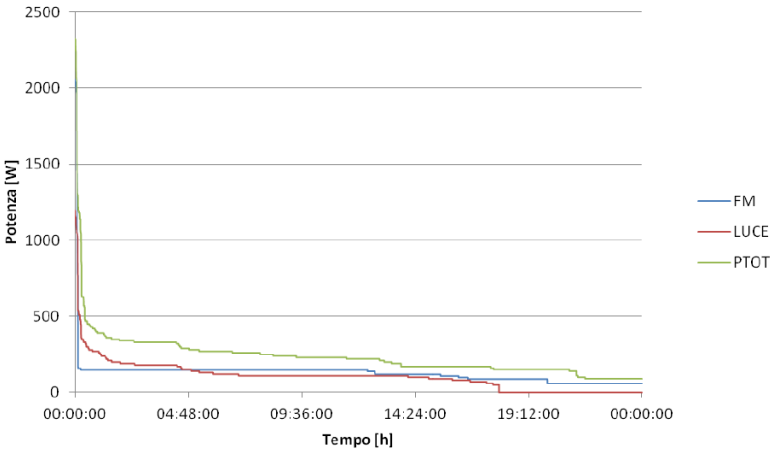


Figura 67. Cumulate di potenza riferite al 18/07/2012

Oltre alla forma delle cumulate di potenza, un altro parametro che identifica il tipo di carico e quindi permette di scegliere l'accumulo più opportuno, è il valore dell'energia totale giornaliera.

Nella Tabella 7 vengono riportati i valori di energia totale giornaliera per entrambe le linee e per l'intera abitazione.

Tabella 7. Energia giornaliera dal 18/07/2012 al 24/07/2012

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

I valori sono quelli tipici di un'utenza domestica composta da due persone. Questo permette di estendere i risultati della sperimentazione che verrà effettuata sul sito, anche ad altre utenze similari.

In passato è stato sviluppato un modello semplificato delle cumulate di potenza che con soli due parametri potesse identificare la curva caratteristica di un carico.

Il modello utilizzato è:

$$y = \frac{k}{(x+k)^n}$$

dove x è il tempo espresso in ore e y è la potenza espressa in p.u. con base pari alla potenza massima settimanale di ciascuna linea. I coefficienti k ed n sono ottenuti tramite il risolutore del programma Microsoft Excel.

I vincoli utilizzati sono:

- coefficienti positivi;
- energia sottesa dalla cumulata ottenuta con il modello semplificato pari a quella della cumulata originale;
- valore iniziale della curva interpolante pari a quello della cumulata originale.

Una volta calcolati gli scarti tra ogni punto noto della cumulata originale e i corrispondenti punti della linea interpolante semplificata, si sono ricavati i coefficienti k ed n minimizzando la somma dei quadrati di detti scarti.

La logica di gestione dell'accumulo utilizzata in questa attività di ricerca, prevede l'impiego di un accumulo termico e di uno elettrico, quando l'utenza supera una certa soglia di potenza. In questo modo la potenza massima assorbita al punto di consegna sarà pari alla soglia impostata. Il primo ad intervenire, sarà l'accumulo termico, che in questa sperimentazione è un congelatore. Sfruttando la capacità di mantenere la temperatura interna al di sotto dei 16 °C per un periodo di tempo di almeno 4 h se non viene aperto, in assenza di alimentazione elettrica, il congelatore può essere disalimentato quando la potenza complessiva dell'appartamento supera la soglia

preimpostata. In questo modo, si riesce a guadagnare un margine di potenza pari all'assorbimento elettrico di circa 150 W. Quando questo margine non è sufficiente a mantenere l'assorbimento complessivo di potenza sotto la soglia prestabilita, oppure in caso di congelatore non attivo, per cui anche un suo distacco non altererebbe il diagramma di carico dell'appartamento, interviene l'accumulo elettrico. Per un primo dimensionamento della capacità massima dell'accumulo elettrico.

In relazione a quanto esposto è stato studiato e realizzato lo schema di Figura 68.

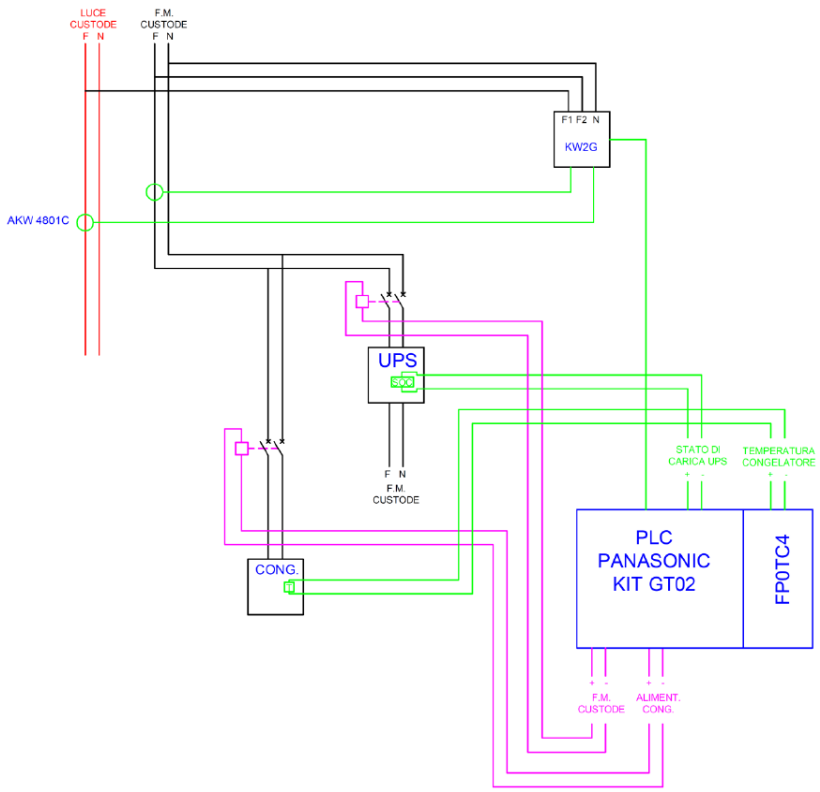


Figura 68. Schema elettrico del sistema sviluppato

I due carichi FM custode e congelatore sono distaccabili in relazione ai valori misurati di potenza totale assorbibile dalla rete. Inoltre per ciascun accumulatore è misurato lo stato ed i rispettivi carichi sono di nuovo rialimentati dalla rete quando lo sto è al disotto di un definito SOC (State of charge). E' evidente la semplicità dello schema e del montaggio dei dispositivi.

Il congelatore utilizzato come accumulo termico ha le seguenti caratteristiche:

- Marca: Whirlpool
- Codice: AFG 015/G/WP
- Volume interno: 130 dm^3
- Alimentazione: 230 V
- Potenza elettrica: 140 W.

L'UPS è stato scelto considerando una soglia di intervento di 500 W, che corrisponde a una potenza erogata di circa 2300 W, considerando che la potenza massima assorbita in una settimana dall'appartamento è stata di 2800 W come si può dedurre dalle cumulate ed è in linea con le comuni unità domestiche aventi una potenza contrattuale di 3 kW.

Impostando una soglia di 500 W, dai calcoli sopra riportati, si ricava una capacità necessaria di almeno 400 Wh.

In conclusione è stata realizzata un'istallazione presso un'utenza domestica che permette di ridurre la potenza massima assorbita dalla rete elettrica di alimentazione in bassa tensione a 1,5 kW rispetto ai 3 kW contrattuali. Il passo successivo non ancora completamente definito è la verifica dell'introduzione di un impianto con fonti rinnovabili sul bilancio energetico complessivo.

F. Indagine tecnologiche e valutazioni di impatto dei sistemi di accumulo

L'attività prevede la prosecuzione dell'indagine delle possibili applicazioni delle batterie al litio nelle reti elettriche, con l'acquisizione di cicli di lavoro per lo svolgimento di funzioni particolarmente convenienti da utilizzare per la caratterizzazione al banco di batterie al litio commerciali. Nel quadro dell'obiettivo sono proseguite le attività di monitoraggio sui sistemi di accumulo alternativi alle batterie al litio ed è stata condotta la campagna sperimentale per la verifica del prolungamento della vita utile delle batterie al litio usate nei veicoli elettrici, denominata "second life", per aumentarne la vita ciclica e, conseguentemente, il valore economico allargandola a chimiche diverse ed applicazioni diverse. Le attività sono state svolte in collaborazione con l'Università di Pisa.

Principali risultati

Sono state studiate le possibili procedure di prova da adottare per la determinazione della capacità residua di accumulatori al Litio in termini di "second life". Tali accumulatori al termine del loro primo utilizzo a bordo delle auto elettriche possono essere reimpiegati in applicazioni stazionarie, dove i requisiti prestazionali appaiono meno stringenti. E' stata definita una procedura di caratterizzazione composta da un ciclo di riferimento ispirato a un tipico impiego stazionario, un ciclo per la valutazione della capacità residua e un ciclo di bilanciamento dello stato di carica [Report RdS/2012/252]. In conclusione è riportato un caso studio che mostra una procedura di test analoga a quella descritta, volta alla caratterizzazione dell'invecchiamento di accumulatori al Litio utilizzati in ambito automobilistico.

Il punto di partenza in questo tipo di analisi è legato all'individuazione del settore di riutilizzo, unitamente al costo, alla sicurezza e alle prestazioni richieste: si tratta cioè di effettuare una analisi globale del ciclo vita della batteria, comprendente sia la prima che la seconda fase di utilizzo. Tali valutazioni vengono effettuate anche prendendo in esame diversi scenari, alcuni raffigurati nella Figura 69.

Come è possibile osservare solitamente la fase di primo utilizzo termina quando la capacità non riesce più a superare il 70-80% del valore nominale, anche se in taluni casi è possibile prevedere il ritiro anticipato dell'accumulo.

Il riutilizzo consente invece di estendere la vita utile della batteria fino a un valore di capacità residua pari al 60%; a seconda degli scenari considerati ciò può consentire di raddoppiare (scenario 1, 3) o addirittura di quadruplicare nel caso di primo utilizzo ridotto (scenario 2) la vita utile della batteria. I diversi scenari vengono analizzati calcolando il valore residuo della batteria al termine della prima fase di impiego (automotive): il valore viene calcolato in rapporto al costo iniziale, ed è funzione della riduzione di prezzo dovuta all'impiego e dei costi di ricondizionamento e manutenzione.

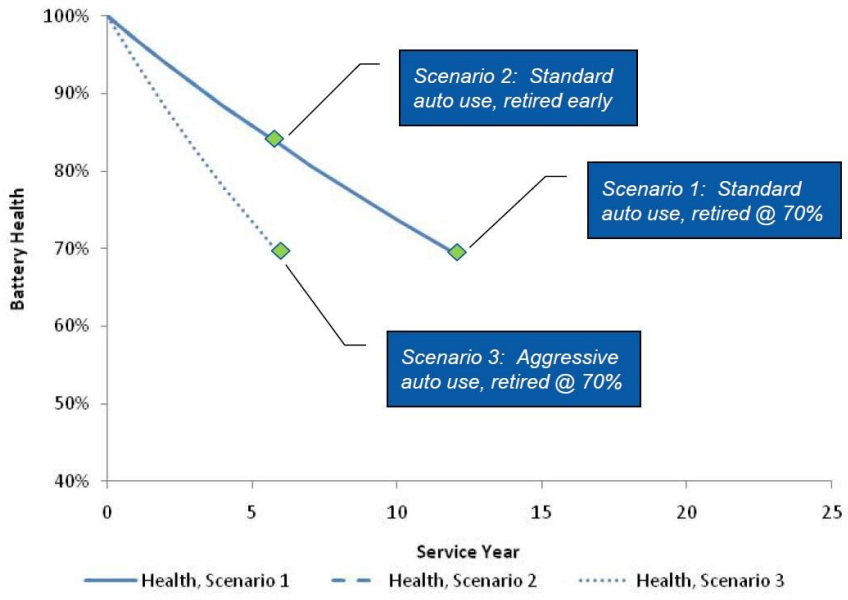


Figura 69. Esempi di scenari di primo utilizzo di sistemi di accumulo

Secondo alcune previsioni al termine della prima fase di uso automobilistico, si ha ancora un valore economico residuo prossimo al 30% del prezzo iniziale. Ciò è immediatamente traducibile in uno sconto sul prezzo iniziale della batteria, a tutto vantaggio dell'utente. In questa analisi non è stato però considerato che il costo delle batterie nuove è destinato a scendere anziché a rimanere costante: i valori residui e i relativi sconti sull'acquisto del nuovo sono pertanto destinati a scendere rispetto a quelli ipotizzati.

In aggiunta all'analisi dei costi appare di un certo interesse effettuare anche una valutazione di impatto ambientale: ciò può effettuarsi attraverso una analisi completa del ciclo vita del sistema di accumulo, dalla costruzione, all'utilizzo fino alla fase di smantellamento. Un esempio di LCA (Life Cycle Analysis) è riportato in letteratura[2]. La prima parte dell'analisi è legata alla caratterizzazione dei sistemi di accumulo in esame dal punto di vista dell'invecchiamento, i cui risultati sono visibili nella Figura 70: è infatti necessario conoscere il numero di cicli corrispondente a una capacità residua di batteria pari all'80% di quella iniziale, valore oltre il quale ha inizio la "second life" dell'accumulatore. Come è possibile osservare dal grafico la cella di impiego automotive può poi estendere la propria vita utile di oltre 1000 cicli, prima di raggiungere l'80% di capacità residua di una cella dedicata per applicazioni stazionarie. La caratterizzazione è stata effettuata prendendo a riferimento procedure predefinite[3].

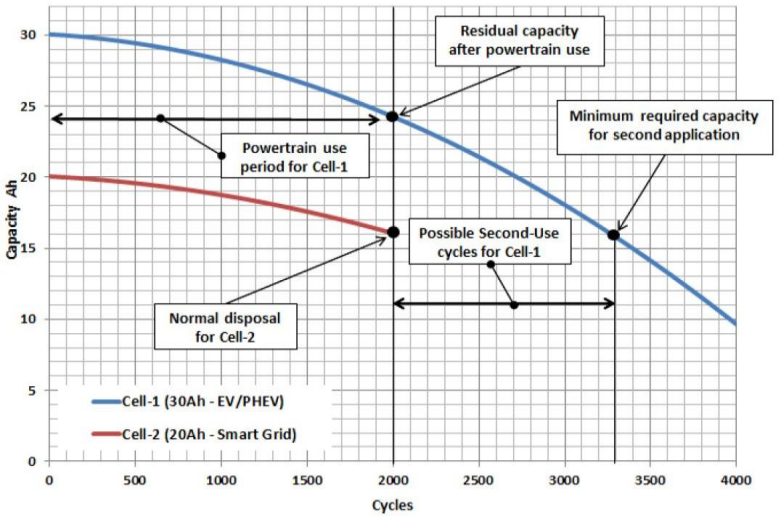


Figura 70. Risultati dei test di invecchiamento

L'impatto ambientale è stato poi valutato prendendo a riferimento l'influenza delle diverse fasi del ciclo vita sui fenomeni di riscaldamento globale, piogge acide ed eutrofizzazione: è stato così definito un punteggio finale complessivo, confrontato poi con quello ottenuto nell'ipotesi di non riutilizzo dell'accumulo. La possibilità di una "second life" per gli accumulatori comporta del resto un significativo risparmio sulla costruzione di nuove celle, in parte controbilanciato dall'utilizzo di accumulatori più scadenti, dal punto di vista dell'efficienza, durante la fase di vita utile. I risultati sono riassunti nella Figura 71, e mostrano una riduzione dell'indicatore di impatto ambientale attorno al 25% nel caso di riutilizzo dell'accumulo in un'applicazione stazionaria, al termine della prima fase di impiego automotive.

Per la definizione di un ciclo di lavoro, gli accumulatori ritenuti non più idonei per applicazioni automotive vengono solitamente riutilizzati in ambito stazionario. La definizione di un ciclo realistico di prova deve dunque ipotizzare questo tipo di reimpiego. A tal fine sono stati analizzati alcuni diagrammi di carico per due diverse utenze tipo: un'utenza domestica e un carico aggregato. In tutti i casi è possibile osservare come i picchi di potenza siano prevalentemente concentrati nella fascia oraria 10-15, oppure in quella 18-20. Una possibile logica di impiego dell'accumulo può dunque prevedere la scelta di un valore di riferimento della potenza erogata dalla rete al di sopra del quale la batteria fornisce il surplus di potenza richiesta, mentre al di sotto della quale viene ricaricata. La batteria viene in questo caso

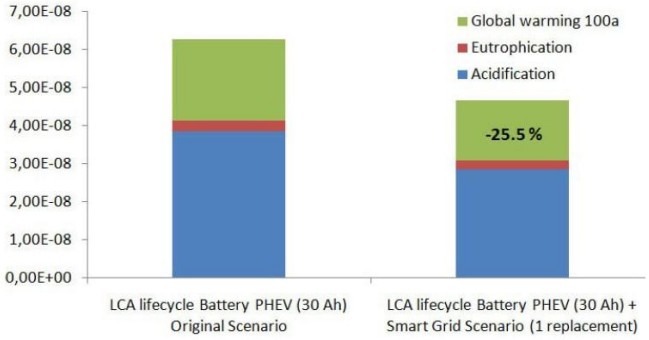


Figura 71. Risultati dell'analisi LCA

[2] P. Cicconi, D. Landi, A. Morbidoni, M. Germani, "Feasibility analysis of second life applications for Li-Ion cells used in electric powertrain using environmental indicators", *2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition*, 2012, Florence, Italy.

[3] M. Conte, F.V. Conte, I.D. Bloom, K. Morita, T. Ikeya, J. R. Belt, "Ageing Testing Procedures on Lithium Batteries in an International Collaboration Context", *25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, Idaho National Laboratory, INL/CON-10-19698, 2010.

dimensionata in funzione del picco di potenza da fornire in scarica, approssimato ad arco di sinusoide, e dell'energia richiesta nell'intervallo temporale di riferimento.

Sulla base di queste considerazioni, è possibile sviluppare il ciclo di lavoro cui la cella o la batteria devono essere sottoposti. Il ciclo è definito come una sequenza ordinata di diverse fasi, di seguito riportate:

- NO (nessuna operazione);
- CI (carica a corrente costante);
- CL (carica a corrente linearmente crescente/decrescente);
- CV (carica a tensione costante);
- SI (scarica a corrente costante);
- SL (scarica a corrente linearmente crescente/decrescente).

In aggiunta ai parametri operativi tipici (durata massima, tensione e corrente richieste) sono presenti anche alcuni controlli di sicurezza: uno sulla tensione limite inferiore (in scarica) o superiore (in carica), l'altro sulla temperatura: al raggiungimento dei valori preimpostati la fase in corso viene interrotta. Gli altri parametri definiscono invece le condizioni operative durante la carica di tipo standard, formata da una fase a corrente costante seguita da una a tensione costante.

Si riporta infine a puro titolo esemplificativo il risultato di un'attività sperimentale di caratterizzazione di una cella al litio ad alta potenza sottoposta a un ciclo di impiego tipico di un veicolo ibrido impegnato in un ciclo di prova standard (NEDC). I test effettuati sono composti da una serie di ripetizioni consecutive della sequenza sotto riportata:

- fase di bilanciamento dello stato di carica. Il valore di riferimento utilizzato nel caso in esame è pari al 60%;
- esecuzione ripetuta di 136 cicli. Il numero di cicli scelto corrisponde ad una percorrenza equivalente pari a circa 1400 km;
- fase di controllo della capacità estratta. Il controllo della capacità avviene secondo le modalità prima menzionate.

I risultati ottenuti sono riassunti in Figura 72. Come è possibile osservare, la percorrenza complessiva, pari a circa 10.000 km, non ha in questo caso inciso significativamente sulla vita dell'accumulo, notandosi una differenza di capacità estratta prossima al 2% di quella iniziale.

Quest'approccio alla definizione di una procedura di prova per la verifica del "second life" di batterie al litio non è stato verificato sperimentalmente per la sua completa messa a punto in quanto le celle al litio, che sono state rese disponibili da alcuni utilizzatori di veicoli elettrici, sono risultate alle prime prove di laboratorio al ciclatore inadeguate perché ormai erano da considerarsi completamente esaurite (a tensione zero e non in grado di essere ricaricate) o comunque con una capacità residua troppo bassa.

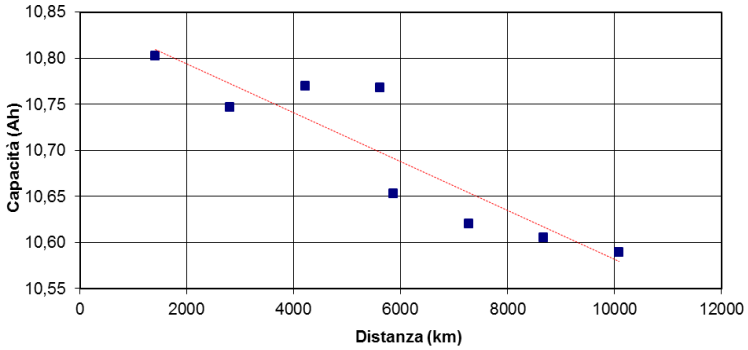


Figura 72. Risultati test di invecchiamento per applicazione stradale

È stata infine effettuata un'indagine con alcune valutazioni, non previste nel progetto iniziale, relative ad alcune tecnologie di sistemi di accumulo di energia non elettrochimici di piccole e medie dimensioni, dalle decine al migliaio di kW, con capacità di accumulo, esprimibile in termini di ore equivalenti a piena potenza h_e, abbastanza elevata (1-4 h_e) [Report RdS/2012/253].

Le tecnologie prese in considerazione sono quelle dei sistemi con energia potenziale idraulica e ad aria compressa (CAES).

E' stata preliminarmente sviluppata un'analisi economica tesa ad individuare le prestazioni minime necessarie in termini di efficienza energetica del ciclo di carica-scarica (round-trip) di sistemi di accumulo in grado di svolgere il

servizio di livellamento del prezzo dell'energia in rete. Dall'analisi emerge che difficilmente questi sistemi di accumulo si possono ripagare con questo servizio e che quindi per un effettivo ritorno economico è necessari che possano svolgere altri servizi alla rete remunerati.

L'utilizzo di un sistema di accumulo secondo una logica di "trasferimento di energia", o "time-shift", consiste nell'acquistare (ed immagazzinare) energia nelle ore a basso prezzo, per poi rivenderla nelle ore in cui i prezzi sono più elevati. E' agevole dimostrare che questo tipo di esercizio è profittevole se il rendimento energetico (round-trip) del sistema di accumulo supera il rapporto fra il prezzo di acquisto e quello di vendita dell'energia.

A simili valutazioni sono state tradizionalmente asservite molte delle logiche di gestione degli impianti idroelettrici di pompaggio, peraltro affiancate:

- nei sistemi verticalmente integrati, da considerazioni inerenti l'esigenza di salvaguardare quote d'acqua per le emergenze, nonché riguardanti l'utilità dell'appiattimento del diagramma di carico giornaliero al fine di aumentare l'affidabilità del sistema e ridurre i costi di modulazione;
- nei sistemi liberalizzati, da strategie complementari volte a vendere parte della capacità dell'accumulo sui mercati della riserva, in maniera ex-ante (disponibilità) o ex-post (effettiva chiamata) a seconda della legislazione vigente.

Si noti che, nel caso degli impianti di pompaggio, la legislazione vigente nei principali sistemi elettrici occidentali prevede che in fase di acquisto il produttore paghi soltanto il prezzo dell'energia, al netto quindi degli oneri di trasporto e relative addizionali; in Italia ciò è sancito dal "Testo integrato per l'erogazione dei servizi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica" (Del.199/11 AEEG, art.19.1). Questo comporta che, ai fini delle suddette valutazioni sul rendimento minimo round-trip e ipotizzando realisticamente una prossima estensione dell'attuale normativa per gli impianti di pompaggio ad ogni forma di accumulo elettrochimico, è rilevante solo il prezzo dell'energia, depurato da ogni onere di rete.

La Figura 73 presenta il confronto fra la media dei prezzi dell'energia nelle 4 ore più care e quella nelle 4 ore più economiche di ciascun giorno, nel periodo 2005-2011 in Italia (Fonte RSE). Come si nota chiaramente, negli ultimi anni il rapporto di prezzo peak/off_peak è progressivamente sceso, esigendo quindi, ai fini della *profitability* di un accumulo, un rendimento round-trip che nel 2010 e nel 2011 è stato prossimo al 50%. Il motivo della recente riduzione del rapporto di prezzo giorno/notte va ricercato da un lato nella crisi economica, che ha ridotto il carico di punta e quindi il corrispondente prezzo di fascia alta (F1), dall'altro nella massiccia entrata in funzione di impianti fotovoltaici a priorità di dispacciamento, che hanno fatto scendere il carico diurno "contendibile" dei gruppi termoelettrici tradizionali, nonché le ore equivalenti di funzionamento di molte unità *mid-merit*, obbligandole a recuperare i costi di investimento aumentando il prezzo notturno dell'energia. L'anomalia dell'ultimo biennio potrebbe comunque essere riassorbita alla ripartenza del ciclo economico, riportando il rapporto di prezzo giorno/notte ad un più usuale 3:1.

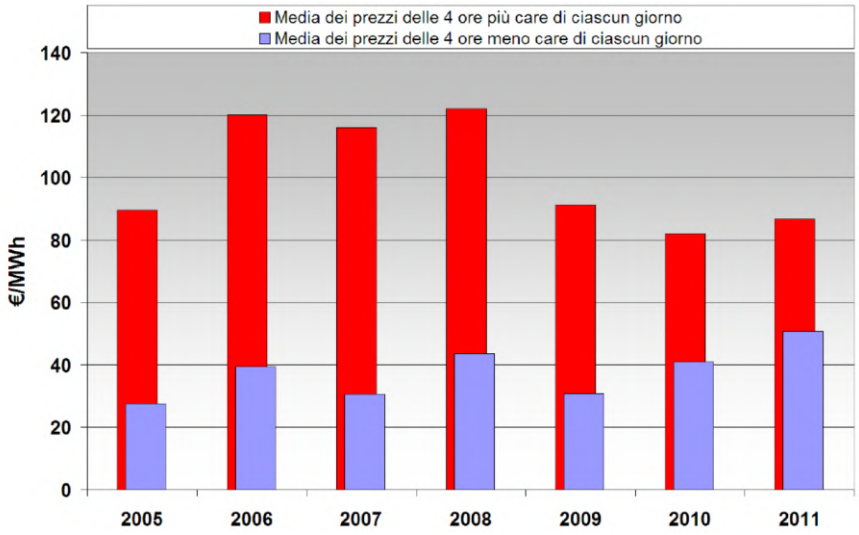


Figura 73. Confronto fra la media dei prezzi dell'energia nelle 4 ore più care e quella nelle 4 ore più economiche di ciascun giorno, nel periodo 2005-2011 in Italia

Si noti che l'analisi svolta sulla media delle 4 ore più care e più economiche, che appare comunque realistica per il ciclaggio giorno/notte di un accumulo elettrochimico, filtra già in maniera significativa gli estremi superiori e inferiori di prezzo. Ad esempio, nel 2011 il prezzo massimo e minimo registrati dalla borsa elettrica sono stati rispettivamente di 10 e 165 €/MWh, mentre nel 2010 si è registrata una forbice 10-174 €/MWh. Questa osservazione fa intravedere ulteriori margini di *profitability* nel caso in cui la capacità dell'accumulo, o comunque la profondità del ciclaggio in servizio di puro trasferimento di energia, fosse inferiore alle 4 ore equivalenti.

Si tenga inoltre presente che:

- la Figura 73 illustra un'elaborazione del PUN (Prezzo Unico Nazionale); in realtà, il vero prezzo di vendita riconosciuto sia operando nel Mercato del Giorno Prima che cedendo energia al GSE (Ritiro Dedicato) è pari al prezzo zonale, che in zona Sud e in Sicilia può essere significativamente più alto di quello diurno (rosso) illustrato in figura[4].
- per contro, il prezzo notturno di acquisto raffigurato in blu in Figura 73può essere indicativo per un grosso impianto (oltre 10 MVA) che compri energia in borsa; nel caso dei piccoli sistemi di accumulo, è invece più realistico ipotizzare l'acquisto di energia sul mercato bilaterale o a tariffa di tutela (maggior tutela o salvaguardia). La conseguente esposizione a un prezzo medio di fascia F3, anziché al prezzo orario, si può tradurre in prezzi medi notturni di acquisto lievemente superiori a quanto riportato in blu in figura. Ad esempio, nel 2011, ipotizzando di acquistare energia sul mercato bilaterale con uno sconto del 6% rispetto alla tariffa di maggior tutela (prezzo medio trimestrale sostenuto dall'Acquirente Unico) il prezzo medio di fascia F3 sarebbe stato di 57 €/MWh, contro i 50 €/MWh riportati in figura.

Quanto esposto riguarda i ritorni economici in termini di bilancio di esercizio: banalmente avendo un sistema di accumulo con un rendimento di round-trip del 50%, l'energia in fase di accumulo deve essere comprata almeno alla metà del prezzo di vendita durante l'erogazione in rete, che, come prima mostrato è, nella situazione attuale del mercato italiano, già al limite se non addirittura del tutto sfavorevole. Ciò implica che se si vuole effettuare un servizio di price leveling occorrono sistemi di accumulo con efficienze di ciclo carica-scarica maggiori del 50%, ragionevolmente occorrerebbe stare almeno sul 60% per tener conto anche degli oneri di conduzione e di manutenzione.

Rimane quindi da verificare come si può disporre di ulteriori introiti per coprire gli oneri di ammortamento e gli utili di impresa.

La soluzione più immediata è quella di disporre di sistemi di accumulo con efficienza maggiore: con calcoli piuttosto banali si verifica immediatamente che, anche con sistemi di accumulo con rendimenti del 90%, occorrerebbe disporre di impianti con un costo minore di 50 €/kWh, certamente impossibile con le attuali tecnologie. Occorre quindi che l'impianto sia in grado di effettuali altri servizi remunerati. Nella Tabella 8 sono indicati i valori di possibili servizi espletabili dai sistemi di accumulo[5] .

Tabella 8. Valore attuale netto (€/kW su una decade) dei benefici economici attesi per differenti servizi

POWER SERVICES							ENERGY SERVICES			
Security					PQ	Access	Security	PQ	Access	Energy effic.
Peak shaving (generation capacity)	Congestion resolution	Islanding	Ramp	Black Start-up	V regulation, active filter, dip, flicker, microinterr.	Peak shaving (network capacity)	Load leveling Valley filling	Medium and long interruptions	Network capacity (several hours/day)	Primary conversion and transport losses
400 ÷ 600	**50 ÷ 150**	**1000 ÷ 1200**	**600 ÷ 800**	**180 ÷ 200**	**350 ÷ 800**	**250 ÷ 300**	**400 ÷ 600**	**250 ÷ 400**	**250 ÷ 400**	**90 ÷ 120**

[4] Per effetto della definizione del PUN (media pesata dei prezzi zonali, assumendo come peso il carico), solitamente i prezzi zonali del Nord e Centro Nord (aree ad alto carico) sono sì inferiori, ma molto prossimi, al PUN.

[5] "Demand Response of urban transport systems: a help for deploying the new Smart Grid paradigm" S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli, F. Vellucci- CIGRE'- Bologna, 2011

Le considerazioni riportate in precedenza sono per affermare che, ragionevolmente, se si vuole avere degli impianti di accumulo di energia elettrica dedicati alla rete non eccessivamente penalizzati sul bilancio economico, occorre che siano in grado di avere un'efficienza del ciclo carica- scarica almeno del 65-70%.

Se si escludono i sistemi di accumulo elettrochimici e quelli elettromagnetici, le tecnologie in grado di esprimere i rendimenti sopra indicati sono: l'accumulo potenziale idrico (in gergo tecnico "sistemi di pompaggio"), l'accumulo cinetico nei volani, l'accumulo potenziale di gas compressi, più usualmente aria (CAES).

L'accumulo cinetico nei volani è adatto a servizi di potenza, poco per quelli di energia perché richiederebbe costruzioni con masse eccessivamente grandi, complicando molto la costruzione, e variazione di velocità molto ampie, con conseguenti complicazioni nei sistemi di conversione elettromeccanici. Infatti i pochissimi attuali costruttori producono sistemi con potenze dell'ordine 10-100 kW e durate di scarica dell'ordine di 0,1-0,3 h_e.

Si è quindi ristretta l'analisi delle possibili tecnologie a quella potenziale idrica e a quella ad aria compressa. In merito dobbiamo però subito considerare che queste tecnologie hanno si efficienze maggiori di quelle indicate come limite in precedenza:

- la potenziale idraulica è quella più sviluppata storicamente e gli attuali più moderni impianti possono superare il 70% di efficienza di ciclo,
- gli impianti CAES possono anche essi arrivare al 70%,

ma, in entrambi i casi, si hanno impianti dell'ordine delle centinaia di MW.

Dovendo prendere in considerazione impianti tra 10 e 1000 kWh, quindi con uno scaling down di almeno 10.000 nella taglia, le efficienze di ciclo saranno più basse ed i costi unitari più alti. Ciò implica necessariamente di pensare ad un impiego di questi impianti di media-piccola taglia in siti dove si possono effettuare molti servizi di rete ben remunerati.

Entrambe le tecnologie sono oggi, come già detto, presenti in realizzazioni di grande potenza (centinaia di MW) e richiedono la disponibilità di siti naturali per la realizzazione di bacini per l'accumulo dell'acqua o di "caverne" per l'accumulo dell'aria. La riduzione di taglia, pur con le penalizzazioni in termini di costi unitari e rendimenti indicati sopra, può invece avere il vantaggio di poter avere più flessibilità nel reperire o costruire gli spazi per l'accumulo dell'acqua e dell'aria.

Per quanto riguarda i sistemi di pompaggio, analizzando le tre componenti principali della costruzione di un sistema di "pompaggio": opere civili, impiantistica e macchinario idraulico, sistema di conversione elettromeccanico e interfacciamento alla rete elettrica, si può dare un ordine di grandezza dei costi unitari e delle efficienze energetiche come riportato nella Tabella 9.

Tabella 9. Componenti principali di un sistema di pompaggio.

	Costi €/kW	Efficienza %
Opere civili	600 - 2000	---
Impiantistica e materiale idraulico	300 – 500	75 - 92
Conversione elettromeccanica ed interfaccia rete	200 - 300	85 - 98
Efficienza complessiva di roundtrip		55 – 82 (*molto variabile con la taglia)*

E' immediato notare come l'incidenza delle opere civili sia preponderante e i valori più alti sono per gli impianti più piccoli e/o per quelli posti in siti più "difficili".

Dovendo considerare impianti di piccola potenza (dalle decine di kW al MW) per cui i costi del macchinario sono più alti e le efficienze più basse, la soluzione più "banale" è quella di non sostenere le spese delle opere civili: perché già esistono o perché i siti sono già strutturati.

E' con questa logica che si propongono tre esempi realistici.

- esempio di sfruttamento di un impianto di innevamento artificiale;
- esempio di utilizzazione di cava a cielo aperto esaurita;
- esempio di sistema antincendio

Nella Figura 74 è mostrato un sito dell'area meridionale in cui sono presenti cave di pietra da costruzione di grandi dimensioni alcune delle quali esaurite. Le cave sono in altezza a circa 150-200 metri rispetto al limitrofo lago salato. L'impermeabilizzazione e la costruzione di condotte di adeguate dimensioni permetterebbero, con stima molto approssimativa, la realizzazione di un sistema di accumulo di 2-4 MW con 4-8 h_e con un costo di prima stima di 1200 €/kW con efficienza di round-trip del 75%.

Poiché l'area è ad altissima densità di impianti eolici, il sistema di accumulo potrebbe usufruire anche di un consistente introito per i servizi di potenza.

L'idea, ancora non ben sviluppata, trova un ostacolo nel fatto che le cave dismesse sono "appetibili" come siti per discariche.

Figura 74. Esempi di cave di pietra da costruzione di grandi dimensioni

Quanto esposto permette di poter suggerire lo sviluppo di un'indagine territoriale a livello nazionale per identificare siti che possano disporre di strutture atte a minimizzare i costi delle opere civili per i sistemi di accumulo e nello stesso tempo realizzare una nuova funzione che possa portare reddito alle strutture esistenti.

La tecnologia CAES (Compressed Air Energy Storage) consiste nell'accumulo di energia sotto forma di aria compressa stoccata in opportuni serbatoi, quando la richiesta del carico elettrico è bassa, e nella produzione di energia elettrica, quando si verificano dei picchi del carico, attraverso le seguenti fasi:

1. rilascio dell'aria compressa dal serbatoio,
2. riscaldamento dell'aria ad alta pressione,
3. espansione attraverso una turbina collegata ad un generatore elettrico.

Poiché il compressore e l'espansore operano in tempi diversi, la tecnologia CAES offre vantaggi significativi rispetto ai convenzionali cicli con turbina a combustione, dove approssimativamente il 55-70% della potenza dell'espansore viene utilizzata per muovere il compressore. In Figura 75 è rappresentato in modo semplice il diagramma di concetto di un impianto CAES.

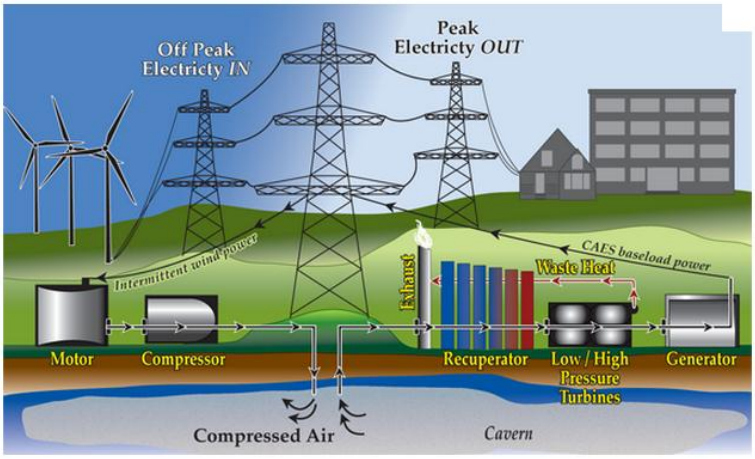


Figura 75. Schema di concetto di un sistema CAES

Lo studio tecnologico del CAES ha più di 40 anni, e ha avuto una reale applicazione a partire dagli anni '70; al momento esistono solo due impianti operanti: l'impianto di Huntorf (Germania) da 290 MWe, il primo ad essere costruito ed operante dal 1978, e l'impianto di McIntosh (1991) da 110 MWe. Attualmente molti progetti sono in via di sviluppo e troveranno a un'applicazione reale nei prossimi anni.

Uno schema di principio di un impianto CAES è riportato in Figura 76. Come si vede dalla figura l'impianto è composto da due parti separate da una frizione: una per la compressione e l'altra per l'espansione. Durante la fase di compressione, il motore-generatore è usato come motore per azionare i compressori che lavorano durante i

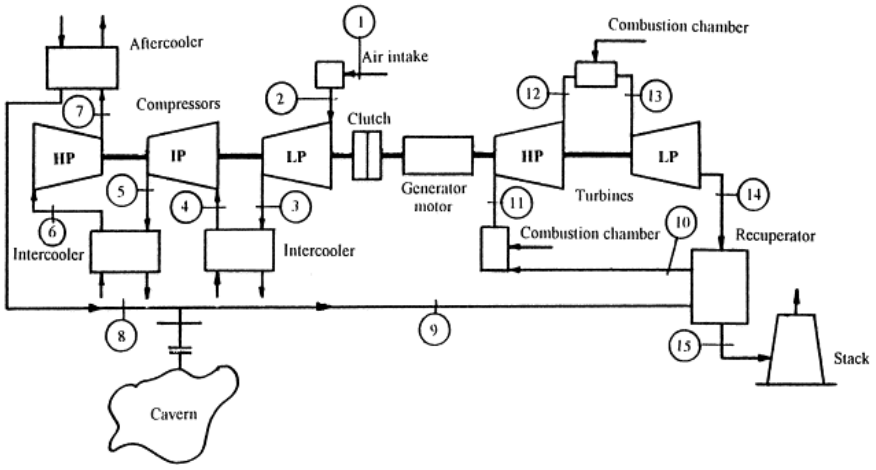


Figura 76. Diagramma schematico di un sistema CAES

periodi di minore richiesta del carico. Il compressore pompa aria ad alta pressione in un serbatoio sotterraneo (cupola di sale, mezzo poroso o roccia), mentre la sezione dell'espansore è scollegata e l'impianto utilizza l'alimentazione della rete elettrica esterna. Quando è richiesta la generazione, l'espansore è collegato al motore-generatore, che agisce come un generatore per produrre energia elettrica. L'aria proveniente dal serbatoio è preriscaldata in un recuperatore, che utilizza il calore di scarico dell'espansore, poi può essere ulteriormente riscaldata in una camera di combustione prima di entrare nel sistema di espansione. Approssimativamente, un kWh di elettricità prodotta richiede circa 0,75 kWh di energia di compressione e 4200 kJ di carburante. L'efficienza di un ciclo di questo tipo è intorno al 65%.

Esistono diverse varianti dei sistemi CAES come, ad esempio, quello riportato nella Figura 77.

I dispositivi CAES possono differire in base al tipo di accumulo; se adiabatico, tutto il calore della compressione è trattenuto nel serbatoio, isolato dall'ambiente esterno, e poi rilasciato con l'espansione. Il progetto tedesco Adele prevede la realizzazione di un impianto di questo tipo da questo tipo da 300 MWe, con un'efficienza del 70%.

Esiste inoltre un'ulteriore soluzione, in cui il calore prodotto durante la compressione viene dissipato da un intercooler e successivamente, durante la fase di produzione, l'aria viene riscaldata prima dell'espansione.

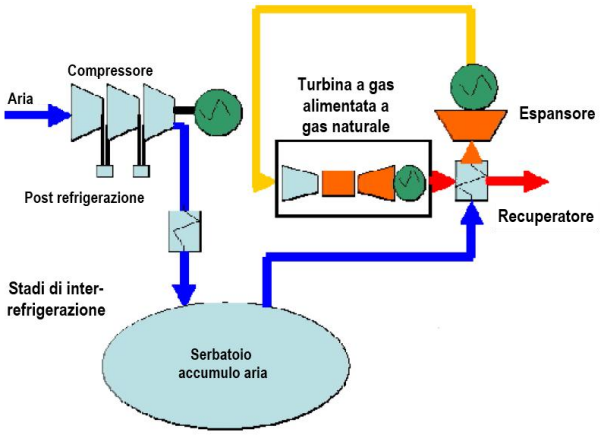


Figura 77. Ciclo CAES + turbina a gas progetto EPRI

I rendimenti di questo tipo di impianti sono solitamente più bassi di quelli di un sistema ad accumulo adiabatico, tuttavia questa soluzione ha un maggiore successo perché più facilmente realizzabile.

Le soluzioni CAES di larga scala sono molto legate alla morfologia del territorio per questo una soluzione di più piccola scala (micro CAES), che impieghi dei serbatoi artificiali, può essere un sistema di accumulo efficace, soprattutto nelle reti distribuite, poiché unisce l'accumulo energetico insieme alla generazione proveniente da varie forme di calore. Un sistema micro CAES è riportato in Figura 78. Il sistema illustrato rappresenta un sistema CAES in cui non viene fornito calore dal combustibile, ma l'aria prima di entrare in turbina viene preriscaldata.

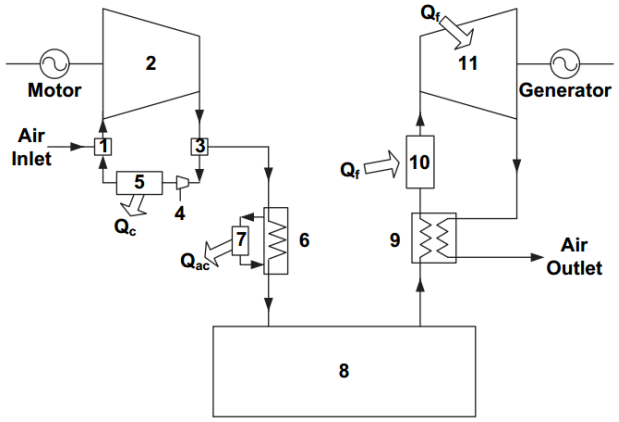


Figura 78. Sistema micro-CAES

I CAES di grandi dimensioni sono in grado di produrre da 100 - 300 MW per 6-20 h, i micro-CAES sono in grado di produrre dai 10 ai 50 MW per una durata di 1-4 h.

Anche la tecnologia dei micro-CAES è ancora in fase di sviluppo, esistono numerosi studi teorici e progetti, tuttavia ancora non esistono dei prodotti effettivamente industrializzati.

Ai fini del dimensionamento di un micro-CAES, si propone di utilizzare lo schema illustrato in Figura 79 che mostra un sistema CAES accoppiato con una microturbina a gas: si ipotizza che il sistema sia adiabatico e che la compressione del gas sia di 350 bar.

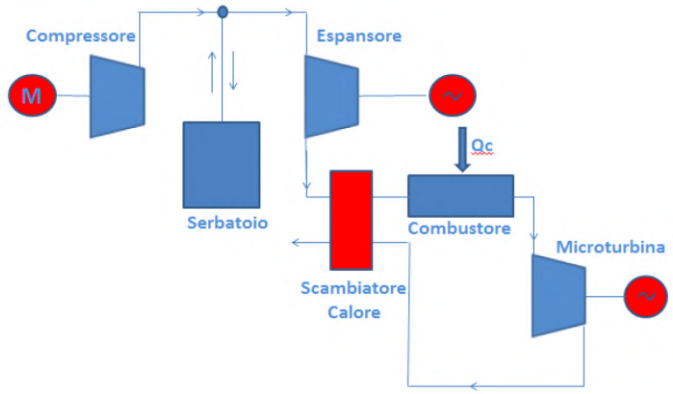


Figura 79. Sistema Micro-CAES con serbatoio adiabatico

La microturbina produce 1,5 MWe con una portata di 3,5 kg/s; si ipotizza, inoltre, che la durata del CAES per l'espansione sia di 3 h, quindi l'energia accumulata nel serbatoio sarà di circa 10 kWh/m^3.

L'efficienza di ciclo del sistema CAES è pari a circa il 70%, calcolata come segue:

$$\eta = \frac{L_{esp} \cdot \eta_e}{L_{com}/\eta_c}$$

dove L_e è il lavoro di espansione e L_{com} è il lavoro di compressione, η_e e η_{com} sono le efficienze dell'espansore e del compressore. La potenza dall'espansore, tenuto conto di un rendimento elettrico dell'85%, sarà pari a circa 3,2 MW contro i 4,6 MW assorbiti dal compressore. Dopo la prima espansione il gas è riscaldato fino alla temperatura di ingresso nella microturbina (circa 1000°C), il calore necessario per riscaldare il fluido è circa 2 MWt, il rendimento del sistema, calcolato secondo la seguente relazione, è essere di circa il 60%:

$$\eta = \frac{P_{esp} + P_{MT}}{(Q_f + P_{com})}$$

dove P_{esp} e P_{MT} sono rispettivamente la potenza prodotta dell'espansore del CAES e la potenza prodotta dalla microturbina; Q_f e P_{com} il calore fornito per riscaldare l'aria all'ingresso della microturbina e la potenza assorbita dal compressore.

Se si considera una microturbina in grado di produrre 300 kW con una portata di 0,7 kg/s, l'intero sistema è scalato in modo tale che la potenza prodotta dal CAES sia pari a 320 kW contro quella assorbita dal compressore (660 kW); l'efficienza di ciclo risulta pari al 65% mentre l'efficienza di sistema sarà pari a circa il 53%, considerando che la potenza necessaria a riscaldare il fluido dopo la prima espansione risulterà essere di circa 500 kW.

Per il calcolo del lavoro di compressione ed espansione per un sistema di tipo CAES sono state considerate le seguenti equazioni per i fluidi comprimibili:

$$l_C = N \cdot c_p \cdot T_1 \cdot (R_c^{\frac{a}{N}} - 1) \cdot 1/\eta_C$$

dove: l_C è il lavoro per unità di massa compiuto dal compressore;
N è il numero di stadi, η_C il rendimento del compressore;
T_1 è la temperatura all'ingresso del compressore;
c_p è il calore specifico a pressione costante;
R_p è il rapporto di compressione;
a è una costate data da $(k\text{-}1)/k$ con $k = c_p/c_v$ con c_v calore specifico a volume costante.

$$l_E = c_p \cdot T_{serb} \cdot (1 - R_e^{\ a}) \cdot \eta_E$$

dove: l_E è il lavoro per unità di massa compiuto dall'espansore;
R_E è il rapporto di espansione dato dal rapporto tra la pressione imposta all'uscita dell'espansore, e la pressione nel serbatoio;
η_E è il rendimento dell'espansore;
T_{serb} è la temperatura all'ingresso dell'espansore.

Per il calcolo della pressione e temperatura all'interno del serbatoio è stata considerata la legge dei gas perfetti.

In sintesi considerando sistemi reali per potenze tra i 300 e i 1500 kW si può pensare ad un rendimento di sistema di circa il 50%. Questa prima indagine pone l'accento sia sui necessari miglioramenti tecnologici nel macchinario di conversione energetica reversibile, ma anche nella possibilità di utilizzare strutture diffuse adibite ad altre funzioni, ma facilmente convertibili in sistemi di accumulo con costi più accettabili, compatibili con il mercato elettrico della rete nazionale.

G. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali

In quest'ambito sono inserite le attività relative alla partecipazione alle attività dell'IEA su "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes", e "Energy Conservation through Energy Storage" e la partecipazione all'alleanza europea, promossa dalla CE, denominata EERA, relativamente ai temi "Smart grid" e "Energy storage". Inoltre è stata avviata una nuova collaborazione scientifica e tecnologica promossa dal circuito COST (Cooperazione Scientifica e Tecnologica a livello europeo) Action MP1004 sui sistemi ibridi che utilizzano batterie e supercondensatori. L'ENEA è stata delegata dal MIUR nel Comitato di gestione dell'Action.

La partecipazione alle attività dell'IEA

Nell'ultimo anno, è proseguita la partecipazione attiva alle attività dell'IEA su "Electric and Hybrid Vehicle Technologies and Programmes". A tal proposito, oltre a contribuire alla consueta preparazione del Rapporto Annuale, contenente un ampio aggiornamento sullo stato dei programmi e della diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi nel mondo, è stato approvato un programma sperimentale per la verifica dei protocolli di invecchiamento delle batterie al litio, coordinato dall'ENEA; inoltre, l'ENEA, mantenendo la vicepresidenza dell'Accordo, continua ad avere un controllo ed un monitoraggio privilegiato sulla situazione nei vari paesi partecipanti, che sono stati esaminati in 2 riunioni collegiali in Portogallo (a cui non abbiamo partecipato) e negli Stati Uniti a maggio 2012. Attualmente sono all'esame altre proposte di attività congiunte, che l'ENEA, in rappresentanza dell'Italia, sta valutando.

Inoltre è proseguita la partecipazione italiana all'Accordo "Energy Conservation through Energy Storage", anche su richiesta dell'Università di Bologna. Le attività sono prevalentemente concentrate sull'accumulo termico, ma è ormai avviata un'attività sull'accumulo elettrico per le applicazioni stazionarie.

La partecipazione alle attività di gruppi di lavoro internazionali

Dopo una lunga fase di gestazione, a febbraio 2012 sono state avviate le attività dello Joint Programme (JP) "Energy Storage" dell'Alleanza di ricerca europea EERA. L'ENEA ha partecipato ad alcune riunioni preparatorie ed

ha costituito uno specifico gruppo di lavoro (già dallo scorso anno). Il coordinamento dello JP è stato assegnato al KIT (Karlsruhe Institute of Technology) tedesco, con l'ENEA che agisce da vice coordinatore, avendo però ricevuto la responsabilità del sottoprogramma più impegnativo relativo all'Accumulo Elettrochimico. In totale sono stati definiti 6 sottoprogrammi. Inoltre si è anche partecipato alle attività dello JP "Smart grids", contribuendo alle attività sull'accumulo elettrico ed alla redazione di uno specifico rapporto sul tema. È in fase di preparazione un progetto per il 7° PQ della CE sull'accumulo elettrochimico, sviluppato nell'ambito della collaborazione EERA. Infine a luglio 2012 il Ministero dello Sviluppo Economico ha avviato un esame della partecipazione italiana all'ENEA, compresi quelli a coordinamento ENEA.

Inoltre l'ENEA partecipa, su formale designazione del MIUR, all'azione COST "MP1004: Hybrid-ES – Hybrid Energy Storage Devices and Systems for Mobile and Stationary Applications", promossa dalla ESF (Fondazione Europea della Scienza) e finanziata dalla CE. In questo anno si sono tenute 2 riunione operative.

Nella seconda metà del 2012, è stata avviata una collaborazione con MSE per il Clean Energy Ministerial (CEM), un gruppo di lavoro internazionale che coinvolge 2 ministri italiani (Ambiente ed SE) ed un totale di 16 nazioni, che hanno lanciato alcune iniziative tra cui quelle sui veicoli elettrici (su cui è stata chiesta la collaborazione ENEA) e sulle smart grid.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Bologna - Dipartimento di Scienza dei Metalli, Elettrochimica e Tecniche Chimiche

L'Università di Bologna ha collaborato con ENEA negli Obiettivi A e C concentrandosi su materiali catodici della famiglia delle olivine. In particolare i temi sviluppati dal Dipartimento di Scienza dei Metalli, Elettrochimica e Tecniche Chimiche (SMETEC) riguardano la prosecuzione della ricerca (già avviata con il PAR 2008-2009) su nuovi materiali catodici per celle litio-ione, con l'ottimizzazione dei processi di preparazione di tali materiali e la loro caratterizzazione elettrochimica, ed il supporto all'ENEA alla progettazione e prova di celle complete da laboratorio.

I materiali attivi catodici sintetizzati e/o acquistati sono stati anche caratterizzati in termini di stechiometria, purezza, morfologia, granulometria, area superficiale, stabilità termica. Tali fattori, aventi cruciale importanza per lo sviluppo di materiali elettrodici innovativi, sono differenti per ciascun singolo materiale attivo e debbono essere ottimizzati per ciascun sistema litio-ione (ad es.., l'effetto di un possibile assorbimento di elevate quantità di liquido da parte delle particelle di materiale attivo deve essere investigato rispetto alle proprietà elettrochimiche). Questi parametri influenzano la porosità finale del film elettrodico ottenuto e, pertanto, il contenuto di elettrolita presente nell'elettrodo stesso (con notevole effetto sulle prestazioni della batteria specie in termini di potenza).

L'Università di Bologna ha concentrato le sue attività su catodi a base di $LiMnPO_4$ (eventualmente drogato), materiale a struttura olivinica che deintercala/intercala ioni litio a 4,1 V vs Li con una capacità teorica di 170 mAh/g. La capacità teorica del $LiMnPO_4$, pari a quella del $LiFePO_4$ ed anche se di poco superiore a quella ciclabile dalla cobaltite, unitamente al più elevato potenziale di inserzione del $LiMnPO_4$ (0,5-0,6 V) rispetto a quello della cobaltite e del litio ferro fosfato, determinano un aumento pari a circa il 20% dell'energia specifica di una batteria litio-ione con anodo convenzionale di grafite. Inoltre, un potenziale di inserzione di 4,1 V consente ancora l'utilizzo di elettroliti organici commerciali e questo è un sicuro vantaggio rispetto ad altri materiali catodici a più elevato potenziale di inserzione in via di sviluppo, come gli ossidi di nichel e manganese e quelli di nichel, cobalto e manganese, che richiedono lo sviluppo di nuovi elettroliti aventi un più ampio intervallo di stabilità elettrochimica (in particolare per l'elettrodo positivo).

Nel precedente anno l'Università di Bologna aveva già iniziato uno studio sul $LiMnPO_4$ individuando (in accordo con la più recente letteratura) la granulometria in scala nanometrica delle particelle del materiale attivo quale migliore strategia per incrementare notevolmente le prestazioni del materiale stesso.

Università di Camerino - Scuola di Scienze e Tecnologie

L'Università di Camerino ha collaborato con ENEA negli Obiettivi B e C con attività di ricerca relative a materiali anodici per batterie litio-ione di più elevata energia specifica rispetto a quelle sul mercato e operanti con elettroliti convenzionali a base di carbonati organici e sali di litio. In particolare, l'Università di Camerino si concentrerà sullo sviluppo di materiali anodici ed anodi di nuova formulazione (con formulazione Li_xM, dove M rappresenta diversi tipi di metalli) con potenziali capacità specifiche notevolmente superiori (anche fino a 10 volte maggiori) a quelle degli anodi convenzionali a base di grafite.

Per raggiungere l'obiettivo sono stati sviluppati anodi a base di Sn, Si, SnSi, Sb che, come noto dalla letteratura, possono arrivare a capacità specifiche molto più elevate di quelle ottenibili con la più convenzionale grafite che viene utilizzata nella maggior parte delle celle Li-ione attuali. Problema comune a tutti questi tipi di anodi, in cui la reazione elettrodica passa attraverso la formazione (lithium loading) e dissoluzione (lithium unloading) di leghe del tipo Li_xM, (per esempio $Li_{4,4}Si$, $Li_{4,4}Sn$ con capacità di circa 4000 e 900 mA/g), è la grande variazione di volume (300-400%) che determina la degradazione degli elettrodi.

Per ovviare a questo fenomeno i ricercatori hanno seguito varie strade che essenzialmente consistono nella riduzione delle dimensioni delle particelle ed in strutture elettrodiche avanzate in cui è presente un componente capace di accomodare le variazioni di volume (buffering action).

In questo contesto, la letteratura recente riporta la possibilità di utilizzare grafene come supporto per metalli che formano leghe con il litio. Il grafene è una forma allotropica del carbone la cui struttura è costituita da strati planari di atomi di carbonio legati, densamente impaccati in un reticolo cristallino con struttura a nido d'ape.

Esistono vari metodi di preparazione del grafene che vanno dall'esfoliazione di cristalli di grafite alla riduzione di ossido di grafite (GO) ottenuto mediante ossidazione della grafite con forti ossidanti (metodo Hummers). Finora, sono stati studiati vari tipi di compositi a base di grafene per la costruzione di super-capacitori. In questo programma è stata analizzata l'utilizzazione di compositi a base di grafene in batterie litio-ione. La letteratura riporta diversi lavori in cui il grafene è stato utilizzato tal quale come anodo con capacità specifiche che vanno da 540 a ≈ 1250 mAh/g, a seconda della composizione degli elettrodi e dei metodi di preparazione del grafene. Le capacità specifiche di compositi con Sn o Si ottenute da vari autori sono nell'intorno di 900-1000 mAh/g. Nel caso di metalli che formano leghe, il grafene in nanocristalliti nanometrici costituiti da 5-10 strati funziona da materiale capace di tamponare le variazioni di volume conseguenti la formazione delle leghe, da elemento conduttore e da ultimo contribuisce alla capacità totale intercalando litio direttamente. Le attività sono state integrate da attività sperimentali per la completa caratterizzazione dei materiali più studiati.

Università di Palermo - Dipartimento di ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni

Il contributo del Dipartimento di ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET) dell'Università di Palermo ha riguardato le attività di ricerca contenute nell'Obiettivo D. L'obiettivo è lo sviluppo dell'elettronica di gestione e delle relative logiche e strategie di controllo delle interfacce verso la rete di sistemi avanzati di accumulo elettrico, al fine di favorire l'integrazione di impianti di generazione locale da fonti rinnovabili nel sistema elettrico nazionale.

In base alle più recenti regole tecniche e prescrizioni normative per la connessione di utenti attivi alle reti di distribuzione, allo scopo di evitare il degrado nella qualità del servizio nelle reti di distribuzione, nonché di consentire il sicuro esercizio della rete di trasmissione anche in presenza di ingenti quantità di generazione distribuita, gli utenti attivi dovranno, tra l'altro, essere in grado di soddisfare opportuni requisiti funzionali. Inoltre, per il controllo dei transitori in frequenza, si richiede a tali impianti:

- la capacità di ridurre la potenza immessa in rete in risposta ad una variazione della frequenza del sistema al di sopra di soglie predefinite;
- l'inserimento graduale della potenza immessa in rete in modo da minimizzare gli effetti sul sistema in caso di ripresa in servizio;
- l'avviamento dell'impianti di generazione locale con l'aumento graduale della potenza immessa in rete.

Tenuto conto che la maggior parte di generazione locale utilizza fonti energetiche rinnovabili (FER) non modulabili, l'accoppiamento di tali impianti a sistemi di accumulo elettrico può consentire di rendere disponibili i servizi di rete richiesti, come sopra accennati, senza rinunciare a tutta l'energia prodotta. Oltre ai risvolti in termini di più elevata efficienza energetica nella gestione della generazione da fonti rinnovabili, l'accoppiamento ai sistemi di accumulo può garantire maggiore flessibilità di gestione, contribuire a garantire adeguati livelli di *power quality*, assicurare il mantenimento della tensione e frequenza entro range di variazioni accettabili, anche in presenza di disturbi che richiedono interventi correttivi rapidi e in alcuni casi non compatibili con i tempi dei sistemi di regolazione centralizzati.

A tale scopo è stato necessario sviluppare nuovi sistemi di interfaccia e di controllo, in grado di operare sia in base a logiche di controllo locale, sia in risposta a segnali di controllo da remoto provenienti dal gestore della rete di distribuzione. Le attività dell'Università di Palermo hanno riguardato la definizione delle specifiche, la realizzazione e la validazione sperimentale in condizioni operative reali di un dispositivo di gestione e controllo di taglia significativa.

Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi

L'Università di Pisa ha collaborato con l'ENEA, negli obiettivi D, E e F. Le attività di ricerca sono state rivolte allo studio ed alla sperimentazione di sistemi di accumulo di energia per le reti elettriche, con prevalenza per i sistemi al litio.

Le attività hanno riguardato la progettazione esecutiva (attività aggiuntiva rispetto a quello inizialmente previsto nel Piano Annuale di Realizzazione ENEA) di un sistema di controllo ed interfaccia del sistema di accumulo al litio verso la rete elettrica ed il supporto alla successiva caratterizzazione sperimentale; la realizzazione e sperimentazione del sistema "casa attiva"; la definizione delle procedure di prova ed il supporto all'ENEA per la verifica sperimentale della "second life" di batterie al litio. Infine è anche prevista la collaborazione allo studio sulla valutazione delle possibilità di utilizzazione dell'accumulo non elettrochimico insieme alle fonti rinnovabili nella rete elettrica nazionale (attività non prevista nel PAR ENEA).

Per l'Obiettivo D, l'attività, ha riguardato la redazione di specifiche (e successivo supporto all'ENEA per la sperimentazione) per la realizzazione in scala significativa, 20-30 kW, di dispositivi inverter-accumulatori al litio in grado di interfacciarsi in maniera attiva verso la rete di distribuzione in corrente alternata e di alimentare su richiesta la carica degli accumulatori di bordo di veicoli elettrici sia per il trasporto pubblico che per quello privato. Il dispositivo si presenta quindi come una stazione di ricarica "intelligente" in grado di dialogare sia con la rete di distribuzione, per fornire servizi di potenza e di regolazione della tensione, sia con i veicoli in ricarica per gestire la potenza trasferita in relazione al tempo di sosta disponibile ed alla capability della rete di distribuzione.

Nell'Obiettivo E, l'Università di Pisa ha effettuato verifiche sperimentali nel progetto dimostrativo della casa attiva in cui sono state verificate le prestazioni ed i vantaggi energetici ed economici di un sistema integrato di accumulo adatto a fornire servizi di potenza alla rete e di energia all'utenza in una logica "smart user". L'attività è consistita nella realizzazione e sperimentazione di un sistema di accumulo con accumulatori al litio nell'alimentazione di una utenza domestica costituita da un appartamento abitato di proprietà dell'Università di Pisa. L'attività ha incluso il monitoraggio e la registrazione della potenza attiva e reattiva assorbita dall'utenza domestica prescelta, quindi il progetto, la specifica e l'acquisizione del sistema di accumulo nonché la definizione delle logiche di gestione.

Inoltre l'Università di Pisa ha individuato una procedura di prova di invecchiamento di accumulatori al litio. I cicli di lavoro (di carica-scarica in corrente) identificati dovranno essere rappresentativi di possibili impieghi come accumulo stazionario su una rete elettrica di distribuzione, con l'eventuale presenza di fonti rinnovabili, per poterne misurare la vita residua (second life). Ciò permetterà di avere una prima stima di quanto si può prolungare la vita di un accumulatore, utilizzato sulle auto elettriche, in altre applicazioni e quindi quali ipotesi di ripartizione economica del costo dell'accumulatore si può ipotizzare per le due applicazioni

Infine l'Università di Pisa ha condotto con l'ENEA uno studio relativo all'approfondimento, in una visione sistemistica, delle possibilità offerte dall'utilizzo di sistemi di accumulo non elettrochimico distribuiti, quali ad esempio, i piccoli impianti di pompaggio, mini CAES, ecc, da utilizzare in sistemi elettrici per rendere programmabile lo scambio con la rete della produzione da fonte rinnovabile aleatorie.

Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria

Il Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria dell'Università "Sapienza" di Roma ha collaborato con l'ENEA negli Obiettivi A e C (ed in parte in B, non previsto inizialmente). Le attività hanno riguardato la studio sperimentale di materiali elettrodici nano strutturati, in prosecuzione dell'attività già avviata con il PAR 2008-2009, per batterie al litio e litio-ione per applicazioni di potenza attraverso la caratterizzazione elettrochimica, con l'esecuzione di prove di stabilità degli elettrodi mediante ciclazioni prolungate su batterie litio ione formate dall'accoppiamento del catodo a base di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ e titanato di litio come anodo. In particolare, lo studio, assistito dalla caratterizzazione strutturale ed elettrochimica, si è interessata all'ottimizzazione dei processi di preparazione anche in quantità significativa di materiali elettrodici nanostrutturati di batterie al litio e litio-ione per applicazioni di potenza come $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ con $0,1<x<1$ come catodo e di un titanato di litio come anodo.

Le attività hanno previsto, sulla base dei risultati ottenuti nel precedente anno, la sintesi e la caratterizzazione elettrochimica di $LiMn_xFe_{1-x}PO_4$ come materiale catodico e l'ottimizzazione della produzione di TiO_2 sotto forma di nanotubi come materiale anodico. Tutti i materiali sintetizzati e/o acquistati sono stati caratterizzati, presso l'Università di Roma e l'ENEA, in termini di stechiometria, purezza, morfologia, granulometria, area superficiale e stabilità termica.

Infine, nell'Obiettivo C, i materiali e gli elettrodi opportunamente individuati sono stati utilizzati in celle da laboratorio, di piccola taglia, ma in grado di consentire una piena valutazione sperimentale delle prestazioni.

Nuovo nucleare da fissione:collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Il prodotto finale delle attività del progetto è costituito da: a) una serie di attrezzature, laboratori e prove sperimentali, modelli, programmi e piattaforme di calcolo validati per la progettazione nucleare; b) analisi di sistema e di sicurezza di sistemi nucleari innovativi e relativi cicli del combustibile; c) progettazioni concettuali e qualifiche di componenti e sistemi per impianti evolutivi/innovativi; d) sviluppo di tecnologie avanzate per il trattamento e lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi; e) sviluppo di materiali innovativi; f) studi sul nuovo nucleare; g) valutazioni di opzioni scientifiche e tecnologiche, ecc.. Tutto ciò al fine di contribuire allo sviluppo rapido delle competenze e delle infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per una esauriente valutazione della sicurezza degli impianti nucleari attuali e per contribuire allo sviluppo degli impianti nucleari di nuova generazione.

Per il raggiungimento di tale obiettivo il programma supporta solamente progetti proposti e portati avanti nell'ambito di grandi iniziative internazionali/europee o di programmi bilaterali svolti in collaborazione con istituzioni di ricerca di Paesi coi quali l'Italia ha siglato accordi nel campo dell'energia nucleare.

I 439 reattori nucleari di potenza, per una potenza installata di circa 373 GWe, in servizio ante Fukushima in 30 paesi e che coprono circa il 16% della produzione mondiale di energia elettrica, appartengono alla cosiddetta II generazione (la prima generazione è quella degli anni '50 e '60 dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni). Si tratta di reattori in massima parte ad uranio arricchito e moderati e raffreddati ad acqua naturale (pressurizzata o bollente), costruiti negli anni '70 e '80.

La terza generazione - costituita da reattori già certificati e disponibili sul mercato - comprende i reattori avanzati ad acqua naturale. Alcuni di questi sono già in funzione in Giappone, come l'Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe progettato da General Electric e Hitachi), mentre altri - come i ben noti European (o Evolutionary) Pressurized - Water Reactor (EPR da 1600 MWe fornito da AREVA) e l'Advanced Passive AP1000 della Westinghouse - sono in fase di costruzione in Europa e in Asia. Industrie italiane (ENEL, Ansaldo Nucleare, Mangiarotti Nuclear, ecc.) stanno partecipando alla loro progettazione e realizzazione in altri paesi dell'Unione Europea. Esiste poi una classe di reattori evolutivi rispetto ai precedenti - noti come reattori di Generazione III+ - fra i quali spiccano i reattori di piccola o media taglia di tipo modulare (SMR) che hanno recentemente guadagnato l'attenzione dei Paesi in via di sviluppo e l'interesse di operatori elettrici di limitata dimensione, per le loro potenziali caratteristiche di elevata sicurezza, facilità di trasporto, costruzione e ridotto rischio economico-inanziario. Per tale motivo gli SMR sono oggetto dell'International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC) della quale anche l'Italia fa parte - in quanto reattori da realizzare in quei paesi emergenti ed in via di sviluppo che hanno espresso all'IAEA l'interesse a ricorrere, per la prima volta, all'energia nucleare. E' rilevante osservare che anche l'amministrazione americana ha annunciato il lancio di un programma di R&S finanziato dal Department of Energy specificamente rivolto al rapido sviluppo di tali reattori. Va infine ricordato che vari Paesi stanno studiando l'applicabilità dei reattori evolutivi di piccola taglia ad un uso combinato, prevalentemente mirato alla contemporanea produzione di energia elettrica e dissalazione dell'acqua. Gli studi che attualmente vengono svolti in Italia riguardo ai reattori di generazione III e III+, sono soprattutto rivolti alle analisi ed alle verifiche sperimentali che siano rilevanti per valutarne la sicurezza.

Tra i reattori di quarta generazione, invece, alcuni sono ancora allo stadio concettuale mentre altri come MYRRHA (LFR - ETPP) ed ASTRID (DEMO SFR) sono già in una fase di progettazione avanzata, in vista di richiedere all'autorità di sicurezza l'autorizzazione alla costruzione ed esercizio nel 2014.

I reattori di quarta generazione nascono a seguito di un'iniziativa avviata dal Department of Energy (DoE) USA nel gennaio 2000, allorquando dieci paesi si sono uniti per formare il Generation IV International Forum (GIF) col fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi fra circa 30 anni, subentrando all'attuale generazione di reattori a neutroni termici refrigerati ad acqua.

In ambito europeo lo sviluppo dei reattori di IV generazione, con particolare riguardo a quelli a spettro neutronico veloce a ciclo chiuso per la minimizzazione dei rifiuti radioattivi e l'utilizzo ottimale delle risorse naturali, è inquadrato nella European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) dello Strategic Energy Technology-Plan (SET-Plan), di cui anche l'ENEA è membro.

Per quanto riguarda lo smaltimento dei rifiuti radioattivi, sono state maturate nel tempo notevoli esperienze e sono state sviluppate ed adottate una vasta gamma di procedure e di soluzioni tecniche. Oggi, abbandonate definitivamente altre tipologie di smaltimento, come l'affondamento a mare, i sistemi ed i metodi di smaltimento

applicati nel mondo convergono nella sistemazione dei rifiuti di basso e medio livello di radioattività in apposite infrastrutture ingegneristiche superficiali, nella sistemazione di particolari classi di rifiuti a media-lunga vita in infrastrutture ingegneristiche situate più in profondità in particolari strati morfologici e, per i rifiuti ad alta attività e lunga vita, nell'impiego di particolari formazioni geologiche profonde (depositi geologici). L'esperienza che è stata maturata proviene dall'esercizio di circa un centinaio di depositi per lo smaltimento dei rifiuti di medio-bassa attività (in parte già chiusi) e dalle fasi di sviluppo o realizzazione di alcune decine di nuove installazioni (circa 40-50; fonte IAEA).

Un notevole contributo tecnico ai Paesi che hanno avviato o perseguono lo smaltimento dei rifiuti radioattivi e che si sono trovati ad affrontare diverse problematiche, da quelle più tecniche a quelle gestionali, economiche o sociali, deriva dalle Organizzazioni Internazionali delle quali anche l'Italia è membro, quali IAEA, EURATOM e OECD-NEA, dalle quali è possibile avere assistenza tecnica, informazioni e ritorni di esperienza maturata dai vari Operatori.

Le esperienze e gli studi a livello internazionale hanno mostrato che la scelta del sito e le relative procedure di selezione necessitano di diverse discipline tecnico-scientifiche e politico-amministrative. I fattori tecnici riguardano: la geologia, l'idrogeologia, la geochimica, la tettonica e la sismica, i processi di superficie, la meteorologia, gli eventi e le attività antropiche, i trasporti e la viabilità, l'uso del territorio, la distribuzione della popolazione, la radioprotezione e, più in generale, la protezione dell'ambiente.

Gli studi effettuati e le esperienze maturate in campo internazionale, infine, hanno dimostrato che la scelta dei siti di smaltimento dei rifiuti radioattivi è strettamente correlata con le condizioni geologiche di ciascun paese ed influenzata dai requisiti specifici di smaltimento ed inventari radiologici, dalle tipologie principali dei rifiuti da smaltire, dai criteri di conferimento adottati e dall'approccio regolatorio. Tutti questi fattori si ripercuotono sul progetto dell'installazione, sebbene, in generale, il progetto sia sviluppato con l'obiettivo di limitare la migrazione ed il rilascio dei radionuclidi nella biosfera, minimizzare l'esposizione degli operatori e del pubblico, minimizzare gli interventi, la manutenzione e la sorveglianza nella fase post-chiusura. Detto obiettivo è normalmente raggiunto attraverso soluzioni tecniche, quale l'adozione di barriere di confinamento, la realizzazione di strutture ingegneristiche, lo sfruttamento dei fattori ambientali e le caratteristiche geomorfologiche del territorio (concetto di sistema multi barriera).

In prospettiva sarà possibile adottare cicli del combustibile innovati, in particolare basati sulle tecnologie di separazione, riciclo e trasmutazione dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita, attualmente in fase di R&S, che permetteranno di ridurre drasticamente i requisiti del deposito geologico.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il nuovo quadro di riferimento che si è delineato in Italia nel corso del 2011 a seguito dell'incidente di Fukushima, e che ha visto prima la moratoria nucleare di una anno decisa dal Governo ed in seguito l'abrogazione tramite referendum delle normativa che aveva posto le basi per la riapertura dell'opzione nucleare nel nostro Paese, ha richiesto una revisione delle attività di R&S condotte nell'ambito del programma triennale 2009-2011. In particolare, si è ritenuto che le attività messe in campo a supporto di una riqualificazione e potenziamento del sistema industriale per l'impiantistica nucleare attuale (seconda e terza generazione), dovessero essere ridotte a vantaggio dello sviluppo dei sistemi nucleari evolutivi ed innovativi. A questo riguardo il sistema della ricerca, ed in particolare l'ENEA, gioca un ruolo chiave per la capacità di valutazione della consistenza tecnico-scientifica dei reattori di nuova generazione. Si rende quindi essenziale preservare tale capacità di valutazione attraverso il mantenimento di cultura da parte delle risorse umane coinvolte, attraverso la dotazione di strumenti tecnico-scientifici adeguati per l'esecuzione di analisi e prove di confronto (codici di calcolo, database, laboratori, simulatori) e l'ampliamento e rafforzamento della rete di collaborazioni internazionali nel settore.

Per quanto riguarda lo studio della sicurezza per i nuovi impianti nel dopo Fukushima non si può non tenere conto della rivalutazione dei margini di sicurezza a cui saranno sottoposti tutti gli impianti nucleari europei (stress test), che comporterà tanto una nuova valutazione delle risposte degli impianti ad eventi iniziatori determinati da condizioni estreme, quanto la verifica dell'adeguatezza delle misure preventive e delle procedure di gestione dell'incidente. L'impegno sul nucleare di IV generazione deve pure essere mantenuto ad alto livello, poiché l'utilizzo nel medio-lungo termine di sistemi nucleari a spettro veloce unitamente all'adozione di cicli del combustibile chiusi sono considerati requisiti fondamentali ed imprescindibili di sostenibilità dell'energia nucleare, sia in termini di disponibilità di materie prime sia di gestione dei rifiuti radioattivi.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate e tenendo conto delle attività tecniche già avviate nelle precedenti annualità dell'AdP, l'attività di ricerca è stato organizzato su tre linee progettuali:

- LINEA PROGETTUALE 1: Collaborazioni internazionali
- LINEA PROGETTUALE 2: Studi di sicurezza sugli impianti nucleari
- LINEA PROGETTUALE 3: Reattori di IV Generazione.

Il progetto di ricerca ha quindi perseguito i seguenti obiettivi, che si possono suddividere tra quelli a breve e a medio-lungo termine.

- A breve termine si è contribuito a mantenere le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per la ricerca nel settore nucleare in Italia, con particolare attenzione agli studi sulla sicurezza dei reattori. Si è inoltre sostenuto lo sviluppo di una capacità autonoma di valutazione delle diverse opzioni tecnologiche, in particolare dal punto di vista della sicurezza e della sostenibilità anche grazie ad accordi bilaterali con grandi istituzioni di ricerca quali il CEA e l'IRSN, consentendo all'Italia di partecipare a pieno titolo alle grandi iniziative di R&S internazionali/europee (GIF, INPRO, IFNEC, SNETP, ESNII, EERA, programmi EURATOM, ecc.) sul nuovo nucleare, tramite ENEA.
- A medio-lungo termine si è supportato il sistema di ricerca nucleare italiano per lo sviluppo di reattori di IV generazione e relativo ciclo del combustibile in termini di competenze, infrastrutture di ricerca, laboratori, processi di qualificazione, ecc. Al contempo di sono conservate ad alto livello le competenze sul nucleare da fissione per rendere possibile la valutazione di progetti di reattori evolutivi proposti in ambito internazionale. Inoltre, grazie alle competenze e infrastrutture sviluppate, si sino rafforzate le competenze Italiane per condurre la progettazione, realizzazione ed operazione di un prototipo dimostrativo di sistemi nucleari di quarta generazione a ciclo chiuso quale il Lead-cooled Fast Reactor in ambito European Sustainable Nuclear Industrial Initiative e GIF.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

LINEA PROGETTUALE 1: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI

Scopo della linea "Partecipazioni Internazionali" è la prosecuzione delle attività e studi concernenti le partecipazioni a gruppi e comitati internazionali e accordi bilaterali, relativamente ai reattori attuali e innovativi (SMR).
Sono stati condotti inoltre indagini e studi relativi all''incidente nucleare di Fukushima e sulle modalità e significatività degli stress tests, nonché una sintesi relativa allo stato di sviluppo dei reattori EPR in costruzione.

La Linea progettuale è stata quindi suddivisa nelle macro-attività descritte qui di seguito.

- Partecipazione dell'ENEA e del CIRTEN ai comitati e gruppi internazionali. La partecipazione ha interessato sia le principali iniziative riguardanti i reattori veloci di quarta generazione, con il relativo ciclo del combustibile, sia i gruppi di lavoro di NEA, IAEA, GNEP, INPRO, EURATOM, ecc., dedicati allo studio di problematiche tecniche e scientifiche di carattere generale sull'uso dell'energia nucleare. Tale attività ha consentito di sviluppare progressivamente la rete delle relazioni, collaborazioni tecnico-scientifiche e accordi bilaterali con importanti realtà di ricerca. In questa attività sono stati inoltre condotti studi di scenari energetici a supporto del MSE.
- Prosecuzione dell'attività di ricerca nell'ambito dell'accordo ENEA-IRSN sui temi di sicurezza, in particolare sull'analisi degli incidenti mediante simulatori d'impianto, sulla strumentazione nucleare e sullo sviluppo di codici di calcolo per analisi di sicurezza. Continuazione della collaborazione ENEA-CEA nel campo della progettazione impiantistica del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR). In continuazione con la precedente annualità sono stati condotti indagini per instaurare accordi bilaterali sui diversi progetti di reattori di piccola-media taglia di tipo modulare (SMR).
- Prosecuzione della partecipazione ai lavori dei comitati e gruppi internazionali (IAEA, OECD-NEA, GIF, IFNEC ecc.). In particolare è stata rinnovata la partecipazione italiana all' "Halden Reactor Project" dell'OECD-NEA, che permetterà di avvalersi dell'esperienza di un centro internazionale di eccellenza nel dominio "Fuel and Materials" e "Instrumentation and Control". Sono state condotte, al fine di valorizzare in ambito internazionale le attrezzature nucleari nazionali TRIGA e TAPIRO, attività di ricerca riguardanti esperienze integrali per la validazione di codici (codici di trasporto, di evoluzione, di burn-up, ecc.) e sezioni d'urto di interesse nel campo nucleare.
- Continuazione delle attività internazionali che vertono su non proliferazione, safety e security e loro interazione, che costituiscono le cosiddette 3S (Safeguards, Safety, Security), anche alla luce del dopo–Fukushima. Continuazione della la partecipazione agli esperimenti internazionali nell'impianto n-TOF

"neutron-time-of-flight" installato presso il protosincrotrone del CERN, per la misura di sezioni d'urto neutroniche, in particolare per le sezioni d'urto di fissione degli isotopi dell' Americio 241-243.

A. Supporto al Ministero dello Sviluppo Economico - DGENRE per studi di scenario e partecipazione a gruppi e comitati nazionali e internazionali

A.1 Sintesi delle partecipazioni a gruppi e comitati internazionali

E' stato prodotto un documento in cui sono elencati tutti i comitati e i gruppi di lavoro internazionali in cui sono presenti delegati ENEA.

Inoltre, su richiesta del MSE si sono implementate le attività descritte qui di seguito.

- Analisi dell'evento incidentale di Fukushima. L'ENEA, attivatasi immediatamente per lo studio in tempo reale dell'incidente alla centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi, ha proseguito le proprie analisi sull'evento e sulle sue conseguenze tanto a livello interno, quanto partecipando a congressi e sessioni dì lavoro in contesto internazionale. ENEA si è anche fatta promotrice del primo evento di studio rivolto alla comunità nucleare e radioprotezionistica nazionale, organizzando il Workshop "One year after Fukushima: rethinking the future", tenutosi a Bologna ad un anno dall'evento. Tale occasione ha consentito non solo di condividere le più aggiornate informazioni tecniche relative all'incidente, ma anche di creare una base comune tra i principali attori della scena nucleare italiana, per avviare una riflessione sinergica sul futuro del nucleare dopo Fukushima in un contesto internazionale. Sono state analizzate le principali lezioni tratte dall'analisi dell'incidente, e l'impatto che queste avranno sull'intera comunità scientifica nucleare.
- Analisi degli "stress test" approvati dall'ENSREG. Sono state analizzate le tappe principali che hanno condotto alle procedure adottate dalla Comunità Europea e da alcuni paesi limitrofi e i risultati degli "stress test" conseguiti nei vari paesi.
- Studi relativi allo stato di avanzamento dei reattori EPR. Sono stati analizzati gli stati di avanzamento dei tre cantieri di costruzione, due in Europa ed uno in Cina per la realizzazione di due unità. Ad oggi i due cantieri Europei scontano un ritardo significativo sulla tabella temporale dei lavori. Nel frattempo un segnale in Francia sembra suggerire una fase di stretta osservazione delle esperienze dei cantieri europei in atto per aggiustare l'assetto sul piano di realizzazione e promozione del progetto EPR (rapporto Roussely). Non sembra scontare invece nessun ritardo il cantiere Cinese, che vede l'avvio commerciale nel 2013.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/131 Rapporto di sintesi sulla partecipazioni a gruppi e comitati internazionali
- RdS/2012/132 Rapporto di analisi critica degli incidenti occorsi agli impianti di Fukushima
- RdS/2012/133 Stress test for the nuclear power plants of European and neighboring Countries
- RdS/2012/134 Reattore EPR – Lo stato di avanzamento dei cantieri di costruzione.

A2. Studi di scenario

L'attività sugli studi di scenari energetici è stata condotta partendo da un approccio globale , e in particolare il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti quattro parti.

- Ciclo del combustibile nucleare. Confronto tra ciclo aperto in reattori termici e ciclo chiuso in reattori veloci a piombo. Sono qui confrontati alcuni aspetti del ciclo del combustibile aperto di un reattore termico con il ciclo chiuso di un reattore veloce raffreddato a piombo. La chiusura del ciclo del combustibile comporta indubbi vantaggi per quanto riguarda la diminuzione delle risorse di uranio da utilizzare e la riduzione di massa (e volume) del combustibile da stoccare nel deposito geologico. Inoltre la radiotossicità totale per unità di energia viene ridotta, nel lungo termine, di circa 100 volte. Si sono inoltre quantificati i fattori di guadagno per quanto riguarda il calore di decadimento e la radioattività del combustibile.
- Mix energetici con bassa emissione di gas serra. Sono stati analizzati i costi connessi all'attuazione della Roadmap 2050 dell'Unione Europea, che prevede un azzeramento delle emissioni di gas serra nel settore elettrico per l'anno 2050, grazie anche ad un massiccio impiego delle fonti rinnovabili intermittenti: eolico e fotovoltaico. Sono state quindi quantificate le conseguenze per un sistema elettrico nel quale sia presente una rilevante percentuale di fonti intermittenti, con particolare riferimento alla situazione italiana. Le emissioni e i costi dell'elettricità a livello di sistema sono stati calcolati per quattro scenari con diversi mix di fonti di generazione di elettricità. I risultati mostrano i benefici determinati dell'introduzione nel mix della fonte nucleare in termini di minori emissioni, nell'abbassamento del costo del kWh e in termini di certezza nel raggiungimento dell'obiettivo prefissato.
- È stato analizzato l'impatto dell'energia nucleare su sostenibilità ed economicità per varie opzioni di mix

energetici. In questo lavoro sono state considerati gli aspetti economici-finanziari dell'impiego di SMR in diversi scenari di mix di energie rinnovabili e cioè, eolica, stoccaggio di aria compressa e cogenerazione (etanolo tramite biomassa e produzione di acqua dissalata). Nella prima parte dello studio è stato considerato l'effetto sul mercato elettrico italiano di una centrale nucleare SMR da 500 MWe accoppiata con un parco eolico da 500 MWe, più un sistema di stoccaggio di energia ad aria compressa (sistema CAES). Sia la centrale nucleare sia il parco eolico hanno la possibilità di fornire direttamente l'energia alla rete o al sistema di stoccaggio. Sono state valutate differenti strategie e dimensioni del CAES e la simulazione del mercato energetico italiano è stato eseguita sulla base delle 24 h. I risultati dimostrano l'efficacia di un tale scenario (nucleare, fonti rinnovabili e stoccaggio) di ridurre il prezzo dell'energia elettrica per i cittadini, nelle ore di punta. Nella seconda parte dello studio è stata analizzata la capacità degli SMR di risultare economicamente e finanziariamente vantaggiosi rispetto ai ritardi di costruzione dei grandi reattori nucleari e idonei per essere utilizzati in scenari di cogenerazione, in cui viene usata la biomassa per la produzione di etanolo e l'impianto SMR fornisce sia energia elettrica sia vapore (energia termica) ad un impianto di produzione di etanolo e ad un impianto di dissalazione, che produce acqua per un processo biomassa-a-etanolo e/o per uso urbano (potabile acqua). È stato valutato l'andamento della redditività di un simile regime di cogenerazione in funzione di mais, paglia e prezzi acqua, individuando gli intervalli in cui la cogenerazione nucleare è conveniente.

- Sono stati analizzati i diversi scenari per la generazione di energia elettrica in Italia al 2050, compatibili con gli obbiettivi di de-carbonizzazione della "Energy Roadmap 2050" della Commissione Europea, ed i relativi costi. Per tutti gli scenari viene calcolato il costo medio di generazione dell'energia elettrica, comprensivo del costo di accumulo. Il costo di trasporto e distribuzione, eventualmente a mezzo di "reti elettriche intelligenti" è invece escluso e costituirà una voce della componente degli oneri di sistema di una futura bolletta elettrica. Per il calcolo viene utilizzato il codice "COMESE" (COsto MEdio Scenari Elettrici), sviluppato presso il Centro Interdipartimentale "Centro Ricerche Fusione" (CRF) dell'Università di Padova.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/135 Impatto dell'energia nucleare su sostenibilità e economicità per varie opzioni di mix energetici
- RdS/2012/156 Impatto dell'energia nucleare su sostenibilità e economicità per varie opzioni di mix energetici, studio delle variabili macroscopiche energetico-ambientali
- RdS/2012/155 Impatto dell'energia nucleare su sostenibilità ed economicità per varie opzioni di mix energetici, scenari economici

B. Studi nell'ambito di accordi bilaterali

B.1 Analisi incidentali deterministiche e utilizzo di simulatori di impianto a supporto delle verifiche di sicurezza

Viene descritta l'attività svolta in collaborazione tra ENEA e IRSN sul tema della simulazione di reattori nucleari ad acqua in pressione ai fini della valutazione della sicurezza di impianto. Il contributo ENEA ha riguardato la collaborazione, iniziata nel 2011, al progetto del simulatore SOFIA in fase finale di sviluppo presso l'IRSN. In particolare ENEA ha collaborato al miglioramento del modello dell'edificio di contenimento per la configurazione del simulatore SOFIA a 4 loop da 1300 MWe basata su codice CATHARE 2.

Nell' ambito dell'attività si sono inoltre inclusi studi dedicati alla valutazione di sicurezza di impianti nucleari attuali in situazioni di "Long-Term Station Black-Out Tipo" (evento tipo Fukushima). I lavori, condotti in sinergia con l'Università di Pisa e l'Università di Palermo, impiegano due diversi codici di simulazione per studiare gli effetti di tale tipologia incidentale sull'impianto considerato.

I risultati confermano le caratteristiche di sicurezza degli impianti analizzati, almeno per tempi di risposta relativamente ridotti. Ulteriori sviluppi sono necessari per tenere in conto situazioni più complesse e l'intervento di sistemi di sicurezza più avanzati.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/136 Set documentale relativo alle attività nel campo della sicurezza nucleare realizzate in collaborazione con IRSN
- RdS/2012/157 Analisi incidentali deterministiche e utilizzo di simulatori di impianto a supporto delle verifiche di sicurezza. Sviluppo e messa a punto di un modello di un impianto PWR (EPR-like) per preliminari analisi con il codice TRACE di eventi di Station Blackout
- RdS/2012/158. Station blackout analysis: Typical PWR response and investigation on possible operator actions

B.2 Accordo con CEA: Prosecuzione della collaborazione nel campo della progettazione impiantistica nucleare

Il seguente obiettivo è stato caratterizzato dalla implementazione di diverse attività di ricerca e sviluppo, principalmente dedicate alla progettazione di infrastrutture sperimentali.

La prima parte dell'attività è stata svolta in collaborazione tra ENEA e CEA su temi legati allo sviluppo dell'impianto sperimentale Jules Horowitz Reactor (JHR) in costruzione a Cadarache (Francia) da un consorzio internazionale (comprendente anche l'Unione Europea) sotto l'egida dell'OECD/NEA. L'ENEA partecipa secondo varie forme di collaborazione sia direttamente con i propri ricercatori sia attraverso collaborazione bilaterale con le singole Università italiane.

Nel documento finale è riportato il risultato della collaborazione già iniziata nelle annualità precedenti tra ENEA, CIRTEN (nella fattispecie, l'Università di Bologna) e JHR per la progettazione di canali sperimentali del JHR. In particolare, il documento riporta uno studio sull'apporto di potenza generata da sezioni di prova contenenti elementi "attivi" nel caso di spegnimento del reattore in condizioni normali e in condizioni di sicurezza (safety shutdown).

Parallelamente a questa attività, si è iniziata una nuova linea di collaborazione sulla strumentazione e il controllo volta al progetto di nuovi sistemi avanzati da impiegare nelle facility sperimentali in corso di completamento. L'attività svolta in collaborazione con l'Università dell'Aquila, rappresenta uno studio preliminare per sistemi di controllo avanzati da applicare in reattori di nuova concezione.

Parallelamente alle attività di progettazione nell'ambito dell' accordo ENEA-CEA, si sono implementati studi sui rivestimenti di materiali strutturali adottati per migliore la resistenza alla corrosione da metalli liquidi pesanti. L'attività ha riguardato la simulazione, mediante il codice termomeccanico agli elementi finiti CAST3M, delle tensioni generate da carichi termici a simmetria assiale su rivestimenti depositati su acciaio. Lo studio è stato volto alla ottimizzazione delle proprietà di adesione e durabilità delle ricopertura al variare di stechiometria, parametri di deposizione, morfologia, stabilità termica e microstruttura dei rivestimenti, attraverso la riduzione delle tensioni generate all'interno del coating e fra coating e substrato dovute alle differenze nelle proprietà termiche e meccaniche dei materiali. Il codice sviluppato è stato impiegato per simulare il comportamento di ricoperture della lega FeAl su due tipi di substrato: l'acciaio P91 e l'acciaio SS316. Sono state inoltre considerate, al fine di studiarne l'influenza sulle tensioni prodotte dall'esercizio, differenti geometrie della superficie del substrato e differenti spessori degli strati.

Relativamente alle attività di realizzazione di un impianto termoidraulico di piccola taglia con caratteristiche prototipiche degli impianti ad alta pressione e temperatura (180 bar, 360 °C), si è provveduto a

- individuare, sulla base del layout concettuale dell'impianto, le principali caratteristiche di un sistema di gestione, controllo ed acquisizione dati, provvedendo all'approvvigionamento dei principali elementi costitutivi;
- definire gli interventi per completare l'adeguamento delle infrastrutture di servizio dell'impianto ed espletare la procedura di affidamento dei lavori ad un impresa qualificata.

L'impianto sarà destinato ad attività sperimentali relative alla termoidraulica di impianti convenzionali e nucleari di nuova generazione, con finalità formative e didattiche, anche i stretta collaborazione con l'Università.

Nell'ambito del progetto europeo NESC-7 sullo studio degli effetti del "*Warm Pre-Stressing*" (WPS) applicato al Reactor Pressure Vessel (RPV) di reattori nucleari di tipo PWR soggetti a transitori termici severi come i PTS (Pressurized Thermal Shock), ENEA ha collaborato con il CEA nella simulazione di uno dei test sperimentali effettuati presso il CEA di Saclay. Mediante il codice agli elementi finiti CAST3M si sono simulati gli effetti del WPS su un provino cruciforme pre-intagliato sottoposto ad un ciclo di carico di tipo LCF (Load-Cool-Fracture) rappresentativo di un evento PTS. I risultati della simulazione sono stati confrontati con quelli ricavati sperimentalmente al fine di validare i modelli teorico-numerici utilizzati.

Ancora nell'ambito della collaborazione ENEA-CEA, si è implementata una attività di ricerca e sviluppo che ha avuto come obiettivo quello di dotare il codice di calcolo CAST3M di uno strumento completo di analisi che accoppi al modulo termo-igrometrico già esistente (HTCTRAN), un modulo in grado di valutare la risposta termo-meccanica di un calcestruzzo sottoposto sia a carichi meccanici che a sollecitazioni di indotte dalla termica

Infatti, il calcestruzzo è un materiale ampiamente impiegato in ambito nucleare, ed è noto che la salita in temperatura nel calcestruzzo, oltre a modificarne le caratteristiche meccaniche, introduce carichi conseguenti ai gradienti termici, alla pressione prodotta dal cambiamento di fase dell'acqua contenuta nei pori, nonché carichi indotti dai ritiri termo-igrometrici. Ne consegue l'importanza di sviluppare dei modelli predittivi del suo comportamento termo-igrometrico e strutturale adatti ad applicazioni ingegneristiche. Nell'ambito della ricerca sono state individuate le equazioni di bilancio che governano il comportamento termomeccanico, le relazioni

costitutive del materiale e gli schemi numerici risolutivi, facendo in modo che tutto il modello sia implementabile utilizzando gli operatori attualmente disponibili del linguaggio Gibiane, con cui l'utente comunica con il codice CAST3M. E' stato inoltre sviluppato, in via preliminare, un modulo con comportamento puramente elastico che consentirà di stimare il peso relativo dei vari fattori di carico termo-igrometrici. Successivamente si è sviluppato un modulo non lineare utilizzante un modello plastico di tipo Drucker-Prager perfetto e un modello di danneggiamento scalare isotropo alla Mazars in grado di operare in non locale.

Infine, relativamente a studi di *fuel-safety*, si è esaminato l'impatto del tipo di combustibile sulle caratteristiche di sicurezza intrinseche di reattori veloci. Per compiere questo studio, le risposte ai diversi transitori sono esaminati per combustibile metallico ed ossido. Il reattore di riferimento è un reattore modulare veloce al sodio. Sono stati riportati i risultati della simulazione incidentale (Loss of Power) ed il confronto tra i core metallici ed ad ossido, considerando combustibile alla fine del un ciclo (EOC). I risultati hanno mostrato che il core ad ossidi ha caratteristiche intrinseche di sicurezza superiori a quelli metallici. Le attività hanno anche dimostrato la capacità del codice di sistema RELAP5-3D nell'eseguire questo tipo di analisi per i reattori veloci.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/137 Rapporto tecnico sulle attività analitiche a supporto del progetto di canali sperimentali ed esperimenti per Jules Horowitz Reactor (JHR)
- RdS/2012/159 Progettazione neutronica e termofluidodinamica di canali sperimentali di reattori di ricerca
- RdS/2012/160 Studio e analisi di sistemi di controllo implementabili con logiche programmabili per il miglioramento delle prestazioni e della sicurezza di impianti nucleari di nuova concezione
- RdS/2012/161 Sistema di simulazione di logiche di controllo per il miglioramento delle prestazioni e della sicurezza di impianti nucleari di nuova concezione
- RdS/2012/138 Sviluppo di un codice di calcolo per valutare la resistenza a carichi termici di rivestimenti depositati su acciaio esposti a piombo liquido
- RdS/2012/139 Completamento infrastrutture elettriche ed idrauliche per un impianto ad alta pressione per simulazioni termoidrauliche
- RdS/2012/140 Simulazione dell'effetto di warm-prestressing su provini cruciformi
- RdS/2012/141 Aspetti teorici connessi con accoppiamento termo-idro-meccanico in calcestruzzi sottoposti a carico termico e selezione degli algoritmi numerici da implementare in linguaggio Gibiane nel codice CAST3M
- RdS/2012/142 Studio di fattibilità di modelli di simulazione per studi su reattori a sodio

B.3 Collaborazioni Internazionali per studi su SMR

In questa attività è stato esplorato lo stato dell'arte sulla tecnologia degli Small Modular Reactors (SMR), a valle di una serie di incontri scientifici internazionali sul tema organizzati dal Politecnico di Milano nel periodo 2011-2012. La tecnologia degli Small Modular Reactors è oggi una concreta opzione sostenibile nel contesto del dopo-Fukushima e della crisi finanziaria planetaria, specialmente per quei Paesi che non detengono alcun impianto nucleare in funzione. Considerare la scelta degli SMR significa pertanto affrontare allo stesso tempo problematiche tecniche, di sicurezza ed economiche. Lo studio realizzato si propone di affrontare tali aspetti della tecnologia SMR offrendo una rassegna aggiornata delle principali offerte presenti sul mercato e sui progetti di ricerca attualmente in corso, analizzandone le possibili chiavi di successo sul mercato globale per il prossimo futuro.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/143 Reattori di piccola/media taglia. Possibili sviluppi e collaborazioni
- RdS/2012/162 Collaborazioni internazionali per studi su Small Modular Reactors (SMR)

C. Partecipazione ad attività, gruppi e comitati internazionali

C.1 Iniziative EURATOM: SNETP, ESNII, EERA

Scopo dell'attività è stato principalmente la partecipazione ai comitati e gruppi di lavoro internazionali sul nucleare da fissione, come sintetizzato nel report RdS/2012/144. Il rapporto riporta relazioni sintetiche e, all'occorrenza, i documenti prodotti.

Nell'ambito dello stesso obiettivo si è inoltre implementata una serie di prove sperimentali di diffusione neutronica ai piccoli angoli e diffrazione neutronica eseguite presso il Reattore ad Alto Flusso dell'Institut Max Von Laue - Paul Langevin (ILL) di Grenoble su materiali di interesse per il nucleare da fissione. Tale attività si inserisce nel più ampio contesto del Progetto EERA JPNM (European Energy Research Alliance Joint Programme on Nuclear

Materials) e di due Progetti Coordinati di Ricerca dell'IAEA (International Atomic Energy Agency). Sono stati prevalentemente studiati acciai strutturali a rinforzo ceramico o "ODS" (oxide dispersion strengthened), che vengono attualmente considerati una delle soluzioni più promettenti per i futuri reattori di quarta generazione ma che richiedono ancora una messa a punto dei processi di produzione e della caratterizzazione meccanica e microstrutturale. Su diversi tipi di tali acciai "ODS", sia ferritico/martensitici sia austenitici, sono state eseguite misure di diffusione neutronica ai piccoli angoli per caratterizzare la presenza di difetti microstrutturali (precipitati, nano-particelle ceramiche) e misure di diffrazione neutronica per identificare le fasi cristallografiche nei vari tipi di materiale. I risultati ottenuti hanno fornito significative informazioni sulla stabilità microstrutturale nel corso di trattamenti termici fino ad elevate temperature e hanno consentito di rivelare fasi minoritarie, non sempre corrispondenti a quelle nominalmente presenti, di cui occorrerà tenere conto nella messa a punto dei processi di produzione. L'insieme di queste ricerche ha prodotto inoltre una metodologia sperimentale di interesse generale per la caratterizzazione dei materiali nucleari e ha consentito all'ENEA di accedere a programmi internazionali, quali EERA JPNM.

Parallelamente, si è provveduto alla messa a punto di codici di calcolo necessari ad una affidabile interpretazione delle misure SANS condotte su materiali nucleari. I codici sono stati implementati in linguaggio Fortran mediante inserimento nel programma di analisi di dati SAS GENFIT. La solidità e affidabilità del codice sviluppato sono stati verificati analizzando spettri SANS di campioni di acciaio prima e dopo irraggiamento, ottenuti sia mediante simulazioni che sperimentalmente, valutando sistematicamente parametri più significativi e assumendo come unica ipotesi l'esistenza nei materiali di una polidispersione diluita di difetti microstrutturali a fattore di forma sferico.

Inoltre, attraverso il programma FULLPROF, si sono analizzate alcune misure di diffrazione neutronica su materiale nucleari di interesse tecnologico. Lo scopo è stato quello di caratterizzare le fasi cristallografiche presenti nel campione e di quantificarne il contenuto. I risultati ottenuti con FULLPROF hanno permesso di individuare la presenza di nanocristalli di ossido di ittrio nella matrice di acciaio martensitico Eurofer-97 e di osservare che il loro contributo all'intensità integrata totale del segnale di diffrazione è pienamente compatibile con la composizione nominale del materiale stesso.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/144 Raccolta delle relazioni di partecipazione ai comitati e gruppi internazionali sul nucleare da fissione
- RdS/2012/145 Contributo a EERA su caratterizzazione materiali mediante diffusione e diffrazione neutronica
- RdS/2012/163 Caratterizzazione di materiali nucleari tramite analisi dati misure diffusione e diffrazione neutronica

C.2 Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali (AIEA , OECD-NEA, GIF, IFNEC ecc.)

L'attività, svolta in sinergia con il CIRTEN, ha riguardato la partecipazione di alcuni gruppi di ricerca ad alcune conferenze internazionali, quali SPRING 2012 CAMP MEETING e alla conferenza ICONE20-POWER2012.

Nell'ambito di tale obiettivo si è inoltre illustrato lo schema di procedura del NESA, sotto i vari aspetti: modelli di analisi, input, output e Reporting, compreso l'identificazione di un possibile NES (Nuclear Energy System) di interesse nazionale (Fase 1), base sulla quale procedere con l'analisi più propriamente quantitativa del NESA_Italia, in collaborazione con IAEA e oggetto di una possibile fase successiva dello sviluppo dell'attività (Fase 2).

L'accettabilità del nucleare infatti, soprattutto dopo gli eventi di Fukushima, passa anche attraverso un processo di analisi e valutazione approfondite e puntuali in merito alla sua capacità di contribuire allo sviluppo sostenibile; questo vale in modo particolare nel caso dell'Italia che, nonostante le decisioni maturate dopo il referendum del giugno 2011, potrebbe nei prossimi anni trovarsi nella necessità di riconsiderare l'opzione nucleare come parte del suo mix energetico.

Il NESA (Nuclear Energy System Assessment) che affronta la valutazione di un sistema nucleare secondo l'approccio olistico dello sviluppo sostenibile (sociale, economico, ambientale, istituzionale), si configura come azione fondamentale per la valutazione di un possibile sistema nucleare candidato a contribuire in maniera sostenibile alle necessità energetiche nazionali dei prossimi decenni.

Tutti gli aspetti fondamentali connessi all'utilizzo dell'energia nucleare, ambiente, sicurezza, protezione fisica, non proliferazione, gestione rifiuti, economia e infrastrutture, queste ultime intese nel senso sia tecnologiche che istituzionali, vengono analizzati nel NESA con riferimento al ciclo nucleare complessivo (reattori e ciclo del

combustibile) a fronte di principi base (Basic principles), requisiti dell'utilizzatore (User requirements) e criteri (Criteria) della metodologia INPRO della IAEA.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/164 Prosecuzione della Partecipazione a Comitati e Gruppi Internazionali
- RdS/2012/146 Rapporto di avanzamento sullo sviluppo NESA Italy (Fase 1)
- RdS/2012/165 Sviluppo di un NESA di interesse nazionale (Fase 1)

C.3 Partecipazione allo OECD - HALDEN REACTOR PROJECT

L'obiettivo di tale attività è la implementazione della collaborazione ENEA nel contesto della sua partecipazione al Progetto internazionale dell'OECD/NEA Halden Reactor Project (HRP). L'ENEA è entrata nuovamente a far parte del Progetto nel 2011, dopo una breve pausa di qualche anno, come Membro Associato.

Tra le attività svolte si è sviluppata una tecnica di modellazione, il Multilevel Flow Modeling (MFM) utilizzata per monitoraggio, diagnostica e prognostica ai fini della sicurezza per impianti attuali e futuri. I risultati generali sin qui ottenuti serviranno come base per applicazioni future a impianti reali.

Parallelamente si è investigato il problema della chiusura del gap nella camiciatura di una barra di combustibile. Per analizzare tale fenomeno è stato condotto un esperimento con database Studvisk sulla risposta del cladding a rampe di potenza. Lo studio serve come base di riferimento per esperimenti dello stesso tipo in corso di svolgimento ad Halden ai quali si prenderà parte in futuro.

Ancora nell'ambito della collaborazione al progetto HRP, si è prodotta una panoramica degli esperimenti previsti nei prossimi anni, nel reattore di Halden. Gli obiettivi sono abbastanza ampi e vanno dai materiali attuali a quelli innovativi, considerando diverse tipologie di impianto (PWR, BWR e VVER), e si prefiggono l'obiettivo di analizzare il comportamento del combustibile in condizioni incidentali.

La raccolta di dati sperimentali sul comportamento del combustibile potrà sicuramente migliorare la comprensione della meccanica del combustile in funzione dell'andamento effettivo del suo bruciamento (burn-up), fornendo utili dati relativamente ai fenomeni di rilascio gas di fissione, rilasci all'ambiente, generazione d'idrogeno, ecc..

I dati sperimentali saranno inoltre utilizzati per verificare se le correlazioni incorporate nei codici del combustibile sono ancora valide per simulare il comportamento di combustibili innovativi e/o di nuovi materiali. Su questi aspetti viene inoltre fornita una panoramica del codice TRANSURANUS (fuel-pin performance code), discutendone l'adeguatezza e possibili miglioramenti.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/147 Programma di collaborazione ENEA-HRP
- RdS/2012/166 Test su combustibili e materiali avanzati presso HRP

C.4 Infrastrutture nucleari per la ricerca

Un parte rilevante dell'attività di ricerca relativa a questo obiettivo è stata strettamente correlata all'utilizzo del reattore TRIGA Mark II della Casaccia. In particolare si è:

- sviluppata una metodologia di misura del rateo di fluenza neutronica termica equivalente a 2200 m/s secondo le norme ASTM E262-08;
- sviluppato un programma di calcolo mediante codice MathCAD per il calcolo dei parametri (Westcottg-factors, resonace integrals) necessari per l'applicazione delle norme ASTM E262-08;
- misurato sperimentalmente il rateo di fluenza neutronica per diverse posizioni di irraggiamento del reattore TRIGA;
- realizzato un confronto fra misure e calcoli effettuati con il codice Monte Carlo MCNP5.

ENEA ha inoltre sviluppato, nell'ambito delle proprie attività di modellistica e di simulazione, un modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-1. Si sono trattati gli aspetti teorici del modello, gli obiettivi, la struttura, le variabili di ingresso, le variabili di uscita, ecc. Particolare attenzione è stata data alle ipotesi di base della parte neutronica e termica del reattore per avere un quadro completo delle potenzialità del modello. Queste ultime sono messe in evidenza nella parte sperimentale del lavoro svolto.

Si è inoltre fornito un esempio di procedura della interfaccia modello-operatore per evidenziare la versatilità del modello. Infine, si sono realizzate simulazioni delle prove sperimentali del reattore. Queste hanno dimostrato che il modello è in grado di riprodurre il funzionamento dell'impianto nelle molteplici e tipiche condizioni di lavoro del

TRIGA. Si sono analizzate le prove a potenza con e senza scram, le prove specifiche di misura della reattività dello xeno, le prove a potenza zero che hanno individuato una zona di instabilità del reattore. Simulazioni di salita e discesa a potenza hanno messo in evidenza un buon controllo della reattività delle barre, così come il calcolo del periodo stabile rivela un adattamento corretto con la curva In-hour del reattore TRIGA. Infine il modello ha riprodotto le prove incidentali di reattività e di perdita del refrigerante riportate nel Rapporto di Sicurezza del TRIGA.

Nel campo della neutronica, ENEA ha recentemente pianificato misure assolute dei ratei di emissione di sorgenti neutroniche quali ^{241}Am e ^{252}Cf. Tali misure sono normalmente effettuate tramite il metodo del Bagno in Solfato di Manganese ($MnSO_4$), che attualmente è il metodo principale per la determinazione assoluta dei ratei di emissione di sorgenti neutroniche. L'efficienza del sistema è legata alla precisione nella determinazione dell'attività della sorgente di ^{56}Mn diluita nel bagno. L'ENEA possiede, nel Centro della Casaccia, tale dispositivo, ma il suo utilizzo come standard primario presuppone una definizione precisa delle sue caratteristiche radiochimiche e degli opportuni fattori correttivi (fattore di fuga neutronica, assorbimento dei neutroni veloci, autoassorbimento neutronico). Infatti, tra le attività di Metrologia, assume importanza basilare quella della definizione degli standard primari o campioni a cui riferire tutta la catena di misure e valutazioni. A tal scopo è stata effettuata uno studio preliminare che ha riguardato:

- determinazione dell'attività del Manganese (mediante l'utilizzo del reattore sperimentale TRIGA presentenel Centro della Casaccia);
- stima dei fattori di correzione (mediante l'utilizzo del dispositivo presente nei laboratori ENEA,
- simulazioni Monte Carlo per interpretare i dati sperimentali.

Per quanto riguarda lo studio dell'evoluzione del combustibile nucleare, si è implementata un'attività di ricerca che ha avuto come obiettivo lo sviluppo e la validazione, mediante codici di calcolo e misure dirette, di metodologie il più possibile flessibili. La conoscenza della composizione del combustibile nucleare è di fondamentale importanza sia per quanto riguarda gli aspetti di esercizio degli impianti (dinamica dell'avvelenamento del nocciolo, margini di controllo e di spegnimento), sia per quanto riguarda la gestione del combustile post-irraggiamento (back-end del ciclo del combustibile). Lo sviluppo di una metodologia di analisi flessibile dal punto di vista della composizione del combustibile nucleare e della geometria del nocciolo del reattore risulta quindi di particolare importanza ed utilità. E' stata quindi sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCNP ver. 4C e MCB) e misure dirette, per lo studio del burn-up del combustibile nucleare del reattore TRIGA Mark II del LENA. La metodologia è stata validata confrontando i valori calcolati di burn-up del combustibile nucleare con i valori ricavati dai dati e dai parametri di esercizio dell'impianto.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/148 Misure di grandezze macroscopiche per la verifica di modelli codici e dati nucleari in reattori di ricerca
- RdS/2012/149 Il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-l dell'ENEA
- RdS/2012/150 Misure assolute di emissione neutronica mediante bagno di solfato di manganese - rapporto sulle attività teorico-sperimentali in ENEA
- RdS/2012/167 Validazione di una metodologia per lo studio del burn-up del combustibile nucleare

D. Non Proliferazione e Safety & Security

D.1 Resistenza alla proliferazione (GIF, IAEA, NEA, CEA)

In continuità con il lavoro già avviato sullo sviluppo e applicazione delle principali metodologie internazionali per valutazioni di resistenza alla proliferazione e protezione fisica, le azioni svolte in questo ambito hanno lo scopo di delineare lo stato dell'arte delle attività in ambito GIF (Proliferation Resistance and Physical Protection Working Group, PR&PP WG) e IAEA-INPRO.

Si sono sviluppate considerazioni su come i codici di scenario possano fornire, oltre a dati utili nelle valutazioni qualitative sulla resistenza alla proliferazione di sistemi nucleari e associato ciclo del combustibile, anche informazioni utili al progettista di nocciolo per inserire nel sistema elementi che incrementino le caratteristiche di resistenza alla proliferazione. Il concetto, già introdotto da ENEA in ambito IAEA e OECD/ENEA, è stato ulteriormente elaborato nell'Expert Group on Advanced Fuel Cycle Scenarios dell'OECD/NEA e in relazione a sviluppi del codice di scenario francese COSI nell'ambito dell'accordo ENEA-CEA.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nel rapporto:

- RdS/2012/151 Sviluppi metodologici e attività internazionali per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi nucleari innovativi

D.2 Dati nucleari per la chiusura ciclo del combustibile (NEA, CERN)

Il presente lavoro è stato dedicato alla descrizione dei modelli e strumenti di calcolo utilizzati nell'analisi delle sezioni d'urto di fissione indotta da neutroni misurate a partire dal 2002 presso l' impianto n_TOF (acronimo di neutron-TIME-OF-FLIGHT), situato al CERN di Ginevra.

Nel lavoro sono inserite:

- una breve illustrazione delle caratteristiche dell' mpianto, delle tecniche utilizzate nelle misure di sezioni d'urto di fissione e di distribuzioni angolari dei prodotti di fissione e, in particolare, dei risultati ottenuti per due importanti attinidi minori, gli isotopi dell'americio ^{241}Am e ^{243}Am;
- una descrizione del sistema di codici di reazioni nucleari Empire utilizzato nello studio, con particolare riferimento al canale di fissione, i calcoli di sezioni d' urto di fissione di ^{241}Am e ^{243}Am fatti con Empire, il modello di sistema nucleare, atto a descrivere la struttura di nuclei a grande deformazione, e il modello del punto di scissione, utilizzato per il calcolo delle distribuzioni angolari dei prodotti di fissione, con risultati preliminari per la fissione neutronica di ^{233}U.

Nell'ambito delle attività di gestione dei rifiuti nucleari ad elevata radiotossicità, che risulta essere una delle principali preoccupazioni della pubblica opinione in merito all'utilizzo dell'energia nucleare, sono stati analizzati vari scenari e studi del ciclo del combustibile nucleare, volti a ridurre la quantità di rifiuti. Risultato comune di questi studi è la rinnovata attenzione sulle incertezze dei dati nucleari, motivata dalla necessità pratica di garantire che i sistemi nucleari siano sicuri, affidabili e economicamente convenienti. In particolare i dati nucleari relativi agli Attinidi Minori non sono sufficientemente noti per soddisfare le elevate esigenze in termini di accuratezza e sicurezza. La comunità scientifica è significativamente impegnata allo scopo di migliorare i diversi aspetti della "conoscenza fisica" dei processi di trasmutazione, non ultima la questione della fattibilità delle misure sperimentali atte a produrre risultati significativamente utili alla conoscenza fisica. Si è quindi realizzato uno studio dedicato all'analisi di uno degli aspetti più critici, ovvero la precisione delle misure sperimentali delle sezioni d'urto di (alcuni) Attinidi Minori.

Tra i metodi più efficaci per ridurre la radiotossicità dei rifiuti radioattivi, vi è il bruciamento degli elementi transuranici per fissione o cattura neutronica. Particolare importanza riveste l'isotopo dell'Americio 241, che è considerato tra i nuclidi più importanti per quanto riguarda la tossicità sia a breve che a lungo termine ed è presente in notevole quantità nei rifiuti nucleari. Il processo di trasformazione per cattura di neutroni o fissione può essere simulato numericamente ma alcuni parametri fondamentali quali le sezioni d'urto medie o i valori della probabilità di transizione ai diversi stati finali possibili, in molti casi non sono conosciute con l'adeguata precisione. Rivestono quindi notevole importanza gli esperimenti tendenti a validare ed eventualmente correggere i parametri nucleari di interesse che possano essere convenientemente condotti in reattori di ricerca. Il lavoro prodotto consiste quindi di:

- simulazioni numeriche circa il fission-rate dell' ^{241}Am;
- analisi critica di precedenti esperienze;
- uno studio delle modalità applicabili ad una eventuale nuova misura presso il reattore TAPIRO.

La scelta di questo reattore appare particolarmente interessante perché il suo spettro neutronico rappresenta molto bene quello di un reattore veloce e, anche se la potenza è molto bassa, il valore del flusso è ragionevolmente alto e adeguato a misure integrali di sezioni d'urto.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/153 Sviluppo di modelli avanzati di fissione nucleare e loro applicazioni agli attinidi minori
- RdS/2012/152 Aspetti critici della gestione degli Attinidi Minori attraverso irraggiamento neutronico
- RdS/2012/169 Rivisitazione critica e riprogettazione dell'esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di 241Am, indirizzata verso spettri veloci
- RdS/2012/168 Rivisitazione critica e riprogettazione dell'esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di 241Am, indirizzata verso spettri veloci

D.3 Valutazioni su interfaccia safety and security e normativa (IRSN)

Nell'ambito di questa attività è stata affrontata la tematica dell'interfaccia safety-security che, associata a quella della non proliferazione, viene denominata in ambito internazionale 3S (Safety, Security, Safeguards). Il lavoro si sofferma su alcune considerazioni di carattere generale su safety e security e loro relazione, anche alla luce delle conseguenze dell'incidente di Fukushima, per poi sviluppare in maggior dettaglio come essa viene riflessa nella

normativa nazionale, francese e americana. Si riportano inoltre le conclusioni di un workshop IAEA sull'interfaccia safety e security nei reattori di ricerca e delle recenti riunioni relative alle convenzioni sulla safety nucleare.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nel rapporto:

- RdS/2012/154. Considerazioni e aspetti normativi dell'interfaccia safety e security nucleare

LINEA PROGETTUALE 2: STUDI DI SICUREZZA SUGLI IMPIANTI NUCLEARI

In questa linea progettuale dedicata agli studi relativi alla sicurezza nucleare sono state condotte sia attività già sviluppate nei precedenti PAR relative a reattori attuali ed innovativi sia nuove attività legate alle problematiche emerse dall'analisi dell'incidente di Fukushima. Queste attività sono state suddivise nei seguenti macro-obiettivi:

- Acquisizione e validazione di strumenti di analisi per la valutazione della sicurezza degli impianti nucleari. Queste attività inquadrate principalmente nell'ambito di accordi internazionali di collaborazione bilaterale, in particolare con le organizzazioni francesi CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ed IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), ma anche con la US-NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) hanno permesso all'ENEA di dotarsi di codici e piattaforme di calcolo avanzati ed acquisire le necessarie competenze per il loro utilizzo.;
- Studio, sviluppo ed applicazione delle corrette metodologie per lo studio della sicurezza in reattori attuali ed innovativi. In particolare le analisi di sicurezza già condotte in precedenti PAR sono state ampliate ed approfondite tenendo conto delle verifiche sugli impianti attualmente in operazione resesi necessarie a valle dell'incidente di Fukushima;
- Progettazione preliminare di simulatori ingegneristici di impianto sia per le tipologie di reattore operative in Europa da utilizzare in sistemi integrati di gestione di eventuali emergenze, sia focalizzati sui reattori evolutivi attesi come risposta all'evento di Fukushima tenendo conto degli studi a livello internazionale sulle implicazioni progettuali e gestionali di tale incidente;
- Studi e sviluppo di infrastrutture per la realizzazione di attività sperimentali a supporto delle analisi di sicurezza che hanno compreso sia la progettazione/realizzazione di impianti per la qualificazione di sistemi e componenti innovativi, sia la realizzazione di prove sperimentali per la validazione della modellistica;
- Investigazione delle problematiche connesse alla sicurezza dei depositi di smaltimento dei rifiuti radioattivi sia superficiali che geologici, delle tecniche di monitoraggio per la sorveglianza dei depositi stessi e delle tecniche innovative di caratterizzazione radiologica e di condizionamento dei rifiuti ad essi destinati.

Tutte le attività previste nelle task in cui erano suddivisi i diversi macro-obiettivi della linea progettuale 2 sono state completate e sono descritte nel seguito mettendo in evidenza i risultati raggiunti

A. Sviluppo e validazione di metodi e strumenti per le analisi di sicurezza

A.1 Librerie di sezioni d'urto

Il Gruppo Dati Nucleari di UTFISSM-PRONOC ha concluso l'attività prevista di processamento e validazione di una libreria multi-purpose accoppiata n-γ principalmente dedicata ad applicazioni di schermaggio e danno da radiazione nei reattori a fissione. Rispetto a quanto inizialmente previsto, cioè di effettuare ulteriore validazione della libreria BUGJEFF311.BOLIB (prodotta in ambito PAR 2008-09) su esperienze integrali di schermaggio neutronico, si è preferito dare priorità alla generazione, validazione e documentazione relative alla nuova libreria ENEA-Bologna VITENDF70.BOLIB a gruppi fini (199 n + 42 γ), basata su dati USA ENDF/B-VII.0 e generata con il sistema LANL di processamento dati nucleari NJOY-99.259. Ciò al fine di disporre in tempo utile di un nuova libreria ENEA-Bologna per le analisi di schermaggio nei reattori LWR alternativa alla corrispondente libreria ORNL VITAMIN-B7 (rilasciata nel novembre 2011), basata anche essa su dati USA ENDF/B-VII.0 ma diversamente prodotta con il sistema ORNL di processamento dati nucleari AMPX-6.1 (non ancora liberamente rilasciato). Il rapporto tecnico descrittivo dell'attività costituisce anche il manuale d'uso della libreria.

Si segnala che l'intero package di VITENDF70.BOLIB, contenente i dati di sezioni d'urto ed il manuale d'uso, è già stato trasferito, su opportuna richiesta, ad OECD-NEA Data Bank (Issy-les-Moulineaux, Francia) per la libera distribuzione internazionale dove ha assunto l'identificazione NEA-1870/01 ZZ VITENDF70.BOLIB. Si sottolinea che la libreria prodotta è stata validata, tramite codice di trasporto mono-dimensionale alle ordinate discrete, su circa 80 esperienze integrali di criticità con spettro neutronico termico, intermedio e veloce i cui dati geometrico-composizionali sono stati ricavati dalla banca dati internazionale ICSBEP.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nel rapporto:

- RdS/2012/01 VITENDF70.BOLIB - An ENEA-Bologna Fine-Group Coupled (199 n + 42 γ) Cross Section Library in AMPX Format Based on ENDF/B-VII.0 Data

A.2 Metodi e codici per analisi di neutronica

L'attività svolta è stata incentrata su numerosi temi inerenti l'analisi neutronica ed i suoi metodi per lo studio di nocciolo di reattori ad acqua leggera.

Un primo ambito di ricerca è stato quello dell'approfondimento, come naturale prosieguo delle attività svolte nell'annualità precedente, dell'uso del codice di reticolo deterministico Apollo2, acquisito mediante accordo STC tra ENEA e CEA nel 2011. Tale approfondimento era mirato al potenziamento delle capacità di analisi, calcolo e simulazione dei noccioli di reattori LWR ed è stato impostato cercando di focalizzare l'attenzione su un caso di interesse reale e concreto, ovvero lo studio di un moderno assembly 17x17 per PWR. La finalità è stata duplice. Da un lato l'assembly è stato caratterizzato mediante calcolo, al variare del burnup, delle principali grandezze neutroniche quali: autovalore fondamentale, mappa di flusso (termico e veloce), spettro, indice spettrale, mappa di flusso aggiunto (termico e veloce) e composizione isotopica del fuel.

La validazione delle metodologie di simulazione e di calcolo è stata condotta ricorrendo a raffronti con benchmark OECD/NEA. Dall'altro lato sono state definite le grandezze ed i parametri necessari alla creazione di librerie multiparametro Saphyb indispensabili al codice di nocciolo Cronos2, anch'esso acquisito mediante accordo STC tra ENEA e CEA. Quest'ultimo aspetto è il naturale punto di avvio di uno studio neutronico particolareggiato del nocciolo di un PWR da 900 MWe, finalizzato alla caratterizzazione della composizione isotopica del fuel in funzione della valutazione di termini sorgente connessi ad incidenti severi. L'interesse per un PWR da 900 MWe nasce dal fatto che delle 27 centrali estere frontaliere, 14 sono proprio di tale tipo. In tale filone di indagine si innesta poi lo studio congiunto ENEA/CIRTEN (Università di Bologna) che è stato incentrato sull'utilizzo del codice Apollo2 per la creazione delle 6 librerie Saphyb necessarie allo studio del primo ciclo (o ciclo di avviamento) del nocciolo di start-up di un PWR da 900 MWe, in particolare della classe francese CP1. Tali librerie consentiranno nei prossimi mesi lo studio a livello di nocciolo di tale reattore. Per la creazione di dette librerie è stato fondamentale reperire tutte le informazioni di carattere dimensionale, geometrico e materiale di ogni più piccolo componente del nocciolo, inclusi i veleni neutronici bruciabili, nonché approfondire i metodi di omogeneizzazione spaziale e di generazione dei parametri di riflettore, necessari per il futuro calcolo neutronico 3D, a 2 gruppi di tipo nodale, del nocciolo stesso.

Parallelamente a questa indagine, e con finalità analoghe, è stato condotto anche uno studio complementare sulla metodologia per il calcolo rapido e la sistematizzazione degli inventari di combustibile per un generico nocciolo di reattore LWR. Dal punto di vista teorico e metodologico sono stati messi in evidenza i principali parametri e le principali grandezze fisiche (tipologia di reattore, arricchimento iniziale medio di nocciolo in ^{235}U, potenza termica del reattore, numero e tipo di assembly del nocciolo, gestione in batch di ricariche del nocciolo, burn-up raggiunto allo scarico di un batch, lunghezza temporale del ciclo di irraggiamento in nocciolo, tempo di shutdown per la ricarica, curva del fattore di carico nel tempo a partire dall'istante di inizio ciclo, ecc.) da cui dipendono le concentrazioni isotopiche, ed analizzati i rapporti di interdipendenza tra essi. E' stata poi studiata e testata la procedura di calcolo di inventario basata sul codice Origen-Arp della suite SCALE 6.1 di riferimento per US-NRC, nonché i codici deterministici di cella (2D Newt) e le sequenze di deplezione e bruciamento (T-Depl di TRITON) necessari alla produzione di librerie di sezioni d'urto efficaci ad un gruppo per un generico reattore da utilizzare per il calcolo rapido in Origen-Arp. Sono stati studiati gli inventari di combustibile dei noccioli delle unità incidentate di Fukushima-Daiichi con particolare attenzione per gli isotopi ad alto impatto radiologico e, tra essi, gli isotopi dello xeno.

Un ulteriore filone di indagine ha riguardato, in naturale prosecuzione dell'analoga attività dell'annualità precedente, lo studio mediante simulazione Monte Carlo dell'impatto di un riflettore "pesante" di un PWR da 1600 MWe di generazione III+ sul segnale dei detector neutronici ex-core. In particolare è stata condotta un'analisi della risposta dei detector ad una sorgente di start-up primaria di ^{252}Cf all'interno di un assembly spostato in avanti verso il centro del nocciolo di una posizione rispetto alla configurazione studiata nella scorsa annualità. Analoghi risultati sono stati prodotti per assembly con sorgenti secondarie di start-up di Sb-Be. Questo ha comportato dapprima la valutazione del rateo della reazione $^{123}Sb(n,\gamma)$ in ognuna delle 16 pin di sorgente secondaria per ognuno dei 3 assembly con sorgente secondaria, in 4 segmenti assiali, ed in condizione di criticità; successivamente è stata calcolata la sorgente di neutroni facendo l'ipotesi che essa sia proporzionale al quantitativo di ^{124}Sb (T1/2=60,2 d) presente. Lo stesso calcolo è stato ripetuto poi in condizione di sottocriticità con k=0,95, trasportando i neutroni al di fuori del nocciolo, attraverso il riflettore pesante, sino al detector. I risultati ottenuti per i detector ex-core sono stati riassunti in un articolo presentato alla conferenza TopSafe 2012 svoltasi ad Helsinki nell'Aprile 2012. E' stato poi valutato l'impatto del riflettore pesante sul flux tilt di quadrante

(asimmetria azimutale della potenza dovuta presumibilmente a piccole variazioni della pressione del refrigerante o ad asimmetrie indotte da cause esterne) per le configurazioni HZP e 30% di potenza nominale.

Da ultimo, per quanto riguarda lo sviluppo di metodi per l'analisi neutronica, sono state implementate delle modifiche al codice di trasporto neutronico MCNP5. In particolare sono stati introdotti nuovi algoritmi per la riduzione della varianza in calcoli di autovalore con l'approccio dell'iterazione di sorgente. La motivazione per tali migliorie deriva dalla constatazione che una modifica al valore di v per garantire un sufficiente numero di neutroni figli ad ogni normalizzazione per i casi in cui keff differisca sensibilmente da 1 non era stata ancora inserita nel codice. In conseguenza di ciò, lo sviluppo del codice è stato implementato aggiungendo due step di calcolo: dapprima viene condotta una ricerca di un trade-off tra la popolazione ottima per ogni ciclo ed il punto di normalizzazione successivo; in seguito viene ricercato un trade-off tra la dimensione del ciclo (numero di particelle per ciclo) ed il numero di punti di normalizzazione impostati in input.

Le attività di questa task sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/04 Utilizzo di Apollo-Cronos per calcoli di criticità e di ciclo
- RdS/2012/06 Calcoli per la determinazione della composizione isotopica del combustibile di un PWR da 900 MWe al variare del bruciamento (rapporto congiunto ENEA/CIRTEN)
- RdS/2012/05 Metodologia per la determinazione e la sistematizzazione di inventari di combustibile: messa a punto dei metodi ed applicazione ad alcune tipologie di LWR
- RdS/2012/03 Continuing Analysis with Monte Carlo Techniques of the Impact of the Heavy Reflector of a Typical Large Size GEN III+ Reactor Design on Some Safety Features: Completion of the Ex-Core Detector Calculations from PAR2010 and Examination of the Impact on the Phenomenon of Flux Tilt
- RdS/2012/02 Development of Monte Carlo Algorithms for Eigenvalue Calculations

A.3 Piattaforme di calcolo avanzate per la termo-idraulica

Nel corso della presente annualità ENEA e CIRTEN hanno proseguito nell'implementazione della piattaforma NURESIM-NURISP sul sistema di calcolo ad alte prestazioni CRESCO dell'ENEA. La piattaforma, sviluppata nell'ambito di progetti internazionali, è stato ideata per integrare e sviluppare vari codici utilizzati per gli studi di sicurezza dei reattori nucleari ad acqua all'interno di un'applicazione più estesa basata sulla piattaforma open-source SALOME.

Le attività di ENEA e CIRTEN si sono per ora concentrate sui codici che permettono la simulazione del comportamento termo-idraulico di impianto e di componenti con diverso livello di dettaglio, compreso il loro accoppiamento per applicazione multi-scala. Nell'ambito del PAR 2011 ENEA e CIRTEN hanno proseguito l'attività di implementazione dei codici CFD TRIO_U e NEPTUNE già iniziata nella precedente annualità. Tra i risultati di tale attività vi è la possibilità di eseguire il codice NEPTUNE_CFD in modalità parallela, sebbene alcune limitazioni siano tutt'ora presenti. Per quanto attiene l'accoppiamento delle varie applicazioni della piattaforma, data l'impossibilità ad oggi da parte degli sviluppatori dei codici d'interesse a rilasciare le interfacce software necessarie, si è verificata la possibilità di tale accoppiamento all'interno del software SALOME mediante codici open-source. É stata inoltre portata avanti l'attività di validazione di alcuni codici della piattaforma e testata l'attuale possibilità di accoppiare gli stessi. Per quanto riguarda la fase di validazione, tale attività è proseguita sia per il codice di sistema CATHARE che per i codici CFD NEPTUNE e TRIO_U.

I risultati ottenuti sono descritti nel rapporto congiunto ENEA-CIRTEN:

- RdS/2012/07 Optimization and validation of the CFD modules in the NURISP Platform

A.4 Modellistica e codici per l'analisi di incidenti severi

Le diverse attività effettuate per questo obiettivo rispondono alla necessità, ancor più pressante alla luce dell'evento di Fukushima, di dotarsi di strumenti di analisi di incidenti severi e stima del termine sorgente, come il codice europeo ASTEC e il codice statunitense MELCOR, per lo studio di argomenti quali:

- raffreddabilità del nocciolo durante la fase di re-flooding e raffreddamento del debris;
- processi legati alla interazione tra il nocciolo fuso e il calcestruzzo di basamento del contenimento;
- rilocazione del corium;
- interazioni ex-vessel tra refrigerante e corium;
- sviluppo di incondensabili, in particolare di idrogeno e processi di detonazione e deflagrazione nel contenimento;
- chimica dello iodio nel RCS (Reactor Coolant System) e nel contenimento.

Tali codici di calcolo sono stati acquisiti nell'ambito di accordi internazionali e bilaterali che presuppongono attività di validazione portate avanti da ENEA in collaborazione con CIRTEN.

Una delle linee di attività ha avuto come oggetto il codice ICARE/CATHARE per la termoidraulica del nocciolo degradato. Nell'ambito di un accordo di collaborazione tra l'ENEA e l'Istituto di Radioprotezione e Sicurezza Nucleare (IRSN) francese, proprietario del codice, sono stati eseguiti studi di debris bed reflooding a supporto della progettazione del programma sperimentale PEARL, in fase di preparazione e prossimo svolgimento nel centro di ricerca nucleare francese di Cadarache. Il programma sperimentale PEARL ha lo scopo principale di valutare il raffreddamento di un debris bed nelle condizioni rappresentative di degradazione del nocciolo di un reattore nucleare durante un incidente severo. Il programma è finalizzato alla definizione di un database per la validazione di codici di calcolo per incidenti severi come ICARE/CATHARE.

Sempre in collaborazione con IRSN sono stati eseguiti dei calcoli di sequenze incidentali severe con ICARE/CATHARE, per verificare il suo corretto funzionamento nel calcolo di sequenze incidentali severe fino alle condizioni estreme di degradazione del core, con rilocazione del materiale fuso sul fondo del vessel. Unitamente al calcolo della sequenza incidentale di riferimento, senza l'intervento di sistemi di emergenza atti a mitigare le conseguenze dell'incidente, è stata analizzata una sequenza incidentale con intervento ritardato del sistema di refrigerazione di emergenza per verificare se tale sistema è in grado di arrestare la progressione della degradazione del core e riportare l'impianto in condizioni di sicurezza. Studi di sensibilità sono stati effettuati per fornire un quadro dei parametri fenomenologici più influenti sul possibile raffreddamento del core nella fase di reflooding durante un incidente severo. Il codice è stato anche applicato a una geometria di riferimento rappresentativa del reattore nucleare TMI-2 del tipo ad acqua pressurizzata (PWR). Per approfondire ulteriormente le analisi di sensibilità effettuate nel corso della passata annualità si è considerata una nodalizzazione più fine del nocciolo del reattore.

Un'altra linea di attività è stata dedicata al codice DRACCAR, in corso di sviluppo all'IRSN, il cui scopo è quello di simulare, in modo più dettagliato rispetto ai codici di sistema come CATHARE2, il comportamento termo-meccanico e termo-idraulico di un elemento di combustibile di un reattore pressurizzato ad acqua (PWR), durante un incidente di perdita del refrigerante primario (LOCA). Considerato lo stadio preliminare di sviluppo del codice DRACCAR si è deciso di eseguire una prima verifica dei modelli implementati utilizzando, come base di confronto, i risultati del codice di sistema CATHARE2 con il quale l'IRSN ha simulato il comportamento di un PWR francese (1300 MW di potenza) a seguito di un LOCA, iniziato da una rottura (15 pollici) nella gamba fredda di un circuito del reattore, a valle della pompa di alimentazione. Nel corso del PAR 2011 sono proseguite le simulazioni dell'incidente sopracitato, che nel precedente PAR 2008-09 erano dedicate alla verifica dei modelli relativi al comportamento termo-meccanico della barretta di combustibile, per la verifica del modello termo-idraulico attualmente implementato nel codice.

Un'ultima linea di attività portata avanti in collaborazione con CIRTEN ha riguardato un benchmark basato sull'esperimento PHEBUS FPT3 tra i codici MELCOR 2.1 e ASTEC V2.2. Scopo del benchmark di valutare la capacità di tali codici di calcolo di modellare in modo integrato la fisica dei processi che si svolgono durante un incidente severo in un reattore ad acqua pressurizzata, dalle fasi iniziali di degradazione del nocciolo al comportamento dei prodotti di fissione rilasciati nel contenimento. L'attività ha richiesto lo sviluppo di input deck dell'impianto e del test sperimentale per entrambi i codici. Il confronto dei risultati delle simulazioni con i dati sperimentali ha permesso di mettere in risalto le potenzialità e le debolezze di entrambi i codici.

Le attività di questa task sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/08 Sviluppo e validazione di metodi e strumenti per le analisi di sicurezza: Modellistica e codici per l'analisi di incidenti severi
- RdS/2012/09 Benchmark di validazione dell'esperimento PHEBUS FPT3 con i codici MELCOR 2.1 e ASTEC v2.2

B. Analisi di sicurezza di reattori avanzati ed evolutivi

B.1 Identificazione ed analisi di possibili sequenze incidentali severe

L'attività di identificazione ed analisi di una possibile sequenza incidentale severa in un reattore di tipo evolutivo GEN III è stata condotta in collaborazione tra ENEA e CIRTEN (Università di Pisa), non indirizzandola ad uno specifico progetto di reattore evolutivo, piuttosto prendendo in considerazione un generico impianto nucleare di tipologia convenzionale denominata Mille600. Si è seguito questo approccio poiché questo obiettivo è sostanzialmente dedicato allo sviluppo e approfondimento di una metodologia per l'analisi di sicurezza. La sequenza incidentale severa presa in considerazione è susseguente ad un evento esterno che provoca una perdita

completa di alimentazione elettrica. Le analisi sono state condotte utilizzando il codice MELCOR 1.8.6 che permette di simulare i più importanti fenomeni attesi sia nel circuito primario che nel sistema di contenimento dell'impianto durante la sequenza incidentale fino all'interazione tra il corium fuso e il basamento della cavità.

La raccolta delle informazioni relative all'impianto generico Mille600 è stata effettuata nel corso delle precedenti annualità. Il database risultato da questa raccolta ha permesso lo sviluppo delle nodalizzazioni del sistema primario e del sistema di contenimento per il codice MELCOR. L'analisi della sequenza incidentale ha richiesto una fase di calcolo del funzionamento dell'impianto in condizioni nominali che ha fornito le condizioni iniziali ed al contorno per la particolare sequenza severa scelta. Il successivo transitorio ha permesso di simulare la risposta dell'impianto dall'incidente di perdita dell'alimentazione elettrica esterna ed interna fino all'inizio della fase di degradazione del nocciolo. Sebbene la nodalizzazione sviluppata in questa fase sia piuttosto semplificata e manchi ancora di alcuni importanti dettagli, quali la simulazione dei sistemi di iniezione di emergenza e delle logiche di controllo, essa ha fornito per la sequenza considerata risultati fisicamente plausibili e può costituire un'utile base di partenza per successivi raffinamenti del modello e per analisi di sensitività di una stessa sequenza o di altre sequenze significative dal punto di vista della sicurezza dell'impianto.

Le attività realizzate in questa task sono descritte nel seguente rapporto:

- RdS/2012/010 Valutazione deterministica di una sequenza incidentale che possa indurre condizioni di incidente severo e degli effetti derivanti da eventi esterni

B.2 Valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi a fronte di sequenze incidentali rilevanti ai fini della sicurezza

Lo studio condotto in questo obiettivo ha avuto come oggetto la valutazione comparativa della risposta dei sistemi di sicurezza attivi e passivi in condizioni di incidente estreme, come il transitorio di station blackout emerso dall'analisi dell'incidente di Fukushima-Daiichi. Particolare enfasi è stata posta sui sistemi passivi termoidraulici, che si basano sulla circolazione naturale per la funzione di rimozione del calore di decadimento, implementati nella progettazione delle centrali elettriche di Gen III + e mirate al miglioramento della sicurezza degli impianti.

L'attività è stata condotta attraverso un'analisi dei sistemi di sicurezza per la rimozione del calore residuo implementati nei reattori di ultima generazione, individuando le principali caratteristiche dei sistemi attivi e passivi, e le metodologie per la valutazione della relativa affidabilità con riferimento ad un caso tipo rappresentato dall'Isolation Condenser. I sistemi attivi e passivi che svolgono la medesima funzione sono stati paragonati in termini di affidabilità, sono state analizzate le sequenze incidentali che comportano la degradazione del nocciolo ed infine valutate le risposte e le prestazioni dei sistemi di sicurezza per far fronte alle suddette sequenze incidentali.

L'analisi ha rivelato alcuni spunti importanti, i quali richiedono sforzi significativi da investire in nuovi progetti per soddisfare gli obiettivi di sicurezza ambiziosi. Ad esempio, con riferimento ai sistemi passivi, si riconosce che la valutazione della relativa affidabilità è ancora un problema aperto, soprattutto a causa della quantità di incertezze in gioco, da risolversi all'interno della comunità dei ricercatori nella sicurezza nucleare. Inoltre un'analisi comparativa mostra che il relativo grado di sicurezza è comparabile o perfino inferiore a quello dei sistemi attivi, in quanto la auspicata maggiore affidabilità e disponibilità viene messa in discussione da alcuni importanti aspetti funzionali, compromettendo le loro prestazioni.

Lo studio probabilistico mostra lo stesso ordine di grandezza (intorno a 1.0E-7) relativo ai valori di CDF (Core Damage Frequency) per i due reattori EPR ed AP1000, caratterizzati rispettivamente dall'adozione di sistemi di emergenza attivi e passivi, a fronte dell'incidente di SBO (Station Black Out): pertanto i margini di sicurezza sono comparabili, sebbene sia da osservare che per il reattore EPR tale traguardo sia conseguito grazie alla elevata ridondanza dei sistemi di sicurezza per la rimozione del calore di decadimento. Un elevato livello di ridondanza oltre ad aumentare la complessità dell'impianto stesso, accresce anche il rischio di guasti comuni (come è avvenuto a Fukushima), che possono coinvolgere tutti i sistemi interessati, causandone il fallimento di tutti contemporaneamente.

Si sono tratte le seguenti conclusioni principali:

- per i sistemi di sicurezza passivi: la supposta maggiore disponibilità ed affidabilità viene messa in discussione da alcuni importanti aspetti funzionali, tali da comprometterne la prestazione;
- per i sistemi di sicurezza attivi: il livello di ridondanza provoca un maggiore livello di complessità dell'impianto, che è un fattore di rischio per sé, nonché la vulnerabilità dell'impianto ai guasti di causa comune.

Una descrizione dettagliata delle attività svolte e dei risultati ottenuti è contenuta nel rapporto:

- RdS/2012/011 Valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi a fronte di sequenze incidentali rilevanti ai fini della sicurezza

B.3 Valutazione del comportamento incidentale di reattori SMR

Questo obiettivo è stato sviluppato attraverso due linee di attività che riguardano, da una parte un approccio generale valutativo della caratteristiche di sicurezza dei vari SMR proposti in ambito internazionale, dall'altra l'applicazione di approcci deterministici per la valutazione di queste caratteristiche in progetti di SMR giudicati di particolare interesse e per cui sia disponibile sufficiente informazione.

La prima linea di attività è stata condotta da ENEA ed ha riguardato una rassegna critica di un certo numero di progetti SMR, che già da tempo sono stati presentati in maniera più meno avanzata. In questa rassegna il più possibile aggiornata sono richiamati ed analizzati gli aspetti dei progetti che meglio incontrano le aspettative di sicurezza che la storia degli ultimi eventi, Fukushima in primis ma anche i risultati degli stress test europei, suggerisce per la prossima generazione di reattori.

Tra gli SMR in rassegna è emersa la tipologia dei "PWR Integrati" come quella più contigua alla tecnologia oggi provata ma la meno pronta ad affrontare anche il requisito di "chiusura del ciclo combustibile". Gli SMR di tipo FNR presentano ancora qualche gap di maturazione tecnologica ma appaiono meglio orientati alla chiusura del ciclo combustibile, cosi come i reattori HTGR raffreddati a elio con combustibile TRISO appaiono interessanti per la loro versatilità e semplicità tutta fondata sul successo nella qualifica di una nuova filiera di combustibile.

La seconda linea di attività ha visto un contributo da parte del CIRTEN (Università di Pisa) che è stato indirizzato all'applicazione di un approccio deterministico per valutare la capacità resistente delle strutture più rilevanti ai fini della sicurezza (i.e. RV) di un impianto SMR a fronte di un evento esterno. La valutazione tramite approccio deterministico, cioè mediante simulazione numerica, secondo le indicazioni WENRA, ha riguardato gli effetti indotti da un evento esterno del tipo avvenuto a Fukushima (tsunami) sulla resistenza dell'edificio del reattore (RB), dell'impianto innovativo (NTDR che può essere considerato anche SMR) IRIS.

Il risultato più significativo raggiunto con questa attività è stato verificare che con la metodologia di analisi applicata è possibile ottenere delle indicazioni sul comportamento (capacità di resistenza delle strutture) di uno degli Safety SSCs (structure, sistemi e componenti significativi per la sicurezza) di questo tipo di NPP (la scelta di tale reattore per la verifica suddetta è legata al fatto che per tale SMR, a differenza degli altri, erano disponibili i dati necessari per l'analisi).

Sempre in questa seconda linea di attività è stata inserita la partecipazione dell'ENEA all' "IAEA Collaborative Standard Problem (ICSP) on integral water cooled reactor designs" basato sulla facility integrale dell'Oregon State University MASLWR (Multi-application Small Light Water Reactor), realizzata per valutare l'omonimo concetto SMR di LWR. Il benchmark è indirizzato allo studio di fenomenologie come la stabilità della circolazione naturale e la termo-idraulica dell'accoppiamento di contenimento e sistema primario in condizioni incidentali su cui si basano le caratteristiche di sicurezza intrinseca della maggior parte di SMR del tipo PWR integrale.

Questa partecipazione ha mostrato la capacità del codice RELAP5/Mod3.3, utilizzato in ENEA per le analisi incidentali di reattori LWR, di predire i fenomeni termoidraulici rilevanti nei due transitori (circolazione naturale e loss of feed water flow) simulati, grazie al confronto con i dati sperimentali disponibili. Pertanto il modello RELAP5 è stato impiegato per effettuare alcune investigazioni deterministiche di sicurezza relative alla risposta del sistema OSU-MASLWR a fronte di uno station blackout completo. I risultati preliminari consentono di dimostrare la capacità di tale progetto di poter resistere per oltre 72 ore alla completa assenza di potenza "onsite" ed "offsite", grazie alla relativa bassa densità di potenza e grande riserva d'acqua.

Queste attività sono state documentate e descritte nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/012 SMR - Rassegna aggiornata di alcuni progetti di interesse e valutazioni alla luce dell'evento di Fukushima
- RdS/2012/013 Valutazione del comportamento incidentale di reattori SMR
- RdS/2012/014 Deterministic safety analysis of Station Blackout postulated accident on the basis of the SMR simulator MASLWR

C. Progettazione simulatori ingegneristici

C.1 Progettazione simulatori incidentali per sistemi integrati di gestione incidenti nucleari

In questo task si è affrontato in collaborazione tra ENEA e CIRTEN (Uni Pisa) il problema della stima del termine di sorgente nell'ambito della simulazione di incidenti che dovessero verificarsi nelle centrali nucleari in Europa. Il

lavoro prende spunto sia dal progetto ENEA 'in progress' denominato DIFURAD, che dalla proposizione in ambito CE EURATOM del progetto di ricerca ET SOURCE presentato nell'anno 2012. Nel primo progetto si punta a realizzare in Italia un sistema integrato di monitoraggio e simulazione in grado di fornire ai decisori nazionali delle informazioni tempestive ed il più possibile accurate sui rilasci attuali e potenziali di radionuclidi nel corso di ipotetici incidenti, con particolare riferimento agli impianti più vicini ai confini nazionali. Nella proposta di Progetto ET Source invece il focus è direttamente sui metodi per la stima del termine di sorgente e su come la gestione di questo problema e la comunicazione al pubblico possano essere migliorati tramite la collaborazione tra Paesi vicini e col supporto dei Paesi più esperti in fatto di sicurezza nucleare. Il comun denominatore tra queste due iniziative è lo sviluppo e sperimentazione di metodi avanzati per stimare il termine di sorgente, ovvero il quantitativo di radionuclidi che dovesse sfuggire dal contenimento della centrale nel corso di ipotizzabili incidenti severi.

Una volta identificata la metodologia generale si è affrontata la questione dei "reattori simulabili". Chernobyl e Fukushima hanno dimostrato che, oltre i 140 reattori operanti in Europa di cui una quindicina situati a meno di 200 km dai confini italiani, anche impianti molto lontani sono da prendere in considerazione perché in funzione delle condizioni dell'impianto e della situazione meteo i rilasci possono raggiungere località molto lontane dal punto di emissione. Si è verificato che i dati disponibili all'ENEA e reperibili in ambito internazionale (es. IAEA), pur limitati ad un numero ristretto coprono un numero importante di tipologie di reattori. I modelli generali costruiti per girare i codici di calcolo per simulare l'incidente possono essere all'occorrenza adattati al reattore attraverso l'acquisizione di un limitato set di dati. Questo approccio risulta compatibile col fatto che nelle prime ore – giorni dall'avviarsi di una sequenza incidentale grave le uniche stime possibili - sulla base dei pochissimi dati che prevedibilmente sarebbero forniti "on time" dall'esercente e/o dalla rispettiva autorità di sicurezza - sarebbero quelle basate su calcoli fatti off-line in funzione della tipologia di incidente presunta. Poi, dopo 24-48 ore potrebbero iniziare ad arrivare le prime stime elaborate con calcoli di impianto dalle agenzie e dalle TSO (Technical Support Organisation).

In seguito si sono definiti i requisiti necessari e sufficienti ad un sistema di codici di calcolo per realizzare la funzione di "Simulatore Incidentale". Vale a dire un sistema software essenziale, con elementi hardware minimali, di gran lunga meno sofisticato ed appariscente delle due grandi famiglie di simulatori complessi: i simulatori di Training ed i simulatori di Ingegneria analizzati nel corso del PAR 2009. Per rappresentare in modo credibile l'impianto e l'evoluzione dell'incidente sono stati identificati 4 codici di calcolo disponibili presso ENEA che potranno essere il backbone del simulatore cercato. Tali codici potranno essere utilizzati in modalità complementare od in alternativa. Due aspetti su cui il team ENEA - Università Pisa si è concentrato sono quelli dell'utilizzo in assetto variabile e la disponibilità di una funzionalità predittiva

L'attività di progettazione del simulatore si è conclusa con la esecuzione di un caso demo per verificare almeno in parte la correttezza concreta delle scelte teoriche fatte nel corso della ricerca.

L'attività realizzata in questa task è descritta nel seguente rapporto:

- RdS/2012/015 Progettazione simulatori incidentali per sistemi integrati di gestione di incidenti nucleari

C.2 Progettazione di simulatori ingegneristici avanzati per reattori LWR evolutivi

Nel task C2 si è studiato il problema della prevedibile evoluzione dei simulatori di impianti nucleari a valle dell'incidente alla centrale di Fukushima e dei conseguenti recenti studi (Stress Tests) che hanno già condotto a delle conclusioni di tipo pratico ed organizzativo su possibili miglioramenti agli impianti esistenti ed in progettazione nel breve, medio e lungo termine.

Mentre l'attività di ricerca condotta per il PAR 2009 presentava primariamente una analisi delle funzionalità e caratteristiche tecniche dei simulatori di ingegneria attuali, in questo lavoro si è cercato di guardare al futuro probabile - o almeno plausibile - cercando di rispondere alla fondamentale domanda: in che modo la prevedibile evoluzione delle tecnologie e delle normative per gli impianti nucleari - anche e soprattutto alla luce delle "lessons learned" da Fukushima - si rifletterà nelle caratteristiche e nelle funzionalità dei futuri simulatori sia di tipo ingegneristico che di training? Le attività svolte in collaborazione con il Politecnico di Milano - hanno preso avvio proprio dall'analisi dei risultati degli Stress Tests. Questo impressionante lavoro di verifica svolto in Europa in circa un anno ha messo in luce aree di auspicabile potenziamento delle caratteristiche di sicurezza intrinseca, attiva e passiva degli impianti nucleari, mettendo in continuazione l'indice sulla problematica relazione tra gli eventi naturali di eccezionale portata e la resistenza (resilienza) degli impianti. In tale contesto si è tenuto conto delle risultanze a livello UE-ENSREG, IAEA, USNRC e autorità giapponesi.

Nel seguito si è cercato di prevedere quali potrebbero essere alcuni tra i reattori nucleari di maggior interesse nel breve-medio e lungo termine sia per l'Italia che per il mondo industrialmente più sviluppato e facente ricorso all'energia nucleare, o per quei paesi, europei e non, che vorrebbero svilupparsi anche in termini di disponibilità di

energia pulita, a bassissima emissione di gas serra, ed a costo accessibile. Sotto tale ottica si sono considerati alcuni tra i progetti più promettenti tra quelli dell'ultima generazione (Gen III o ' III+') e i futuri reattori della IV generazione. Infatti le lezioni imparate da Fukushima inevitabilmente avranno ricadute su tutte le generazioni impiantistiche attualmente definite. Su tali tipologie di reattori sono stati affrontati aspetti sia di tipo impiantistico che spiccatamente di simulazione, cercando di comprendere per quali filiere potrebbero essere necessari i maggiori sforzi evolutivi nella realizzazione sia di simulatori di addestramento che di simulatori di ingegneria. La overview sui reattori di più probabile futuro interesse non ha dimenticato il settore dei reattori di ricerca anche in virtù della disponibilità in ENEA di un impianto termico TRIGA e del reattore veloce Tapiro.

Una volta definiti i potenziali oggetti delle future attività di simulazione, si è analizzato il menu di attività evolutive nella simulazione che sembra discendere per logica direttamente dalle lesson imparate da Fukushim e dalle conclusioni della review ENSREG sugli Stress Tests.

Combinando infine le conclusioni sui possibili reattori con quelle sulle prevedibili innovazioni nella simulazione si è conclusa la ricerca tentando di definire le prospettive di realizzazione di simulatori avanzati (Enhanced Engineering Simulators) in cui ENEA potrebbe avere un ruolo significativo ed estremamente multi-disciplinare. Infatti l'incidente di Fukushima ha messo in evidenza come il campo delle relazioni critiche tra eventi naturali estremi e comportamento delle centrali nucleari nel loro complesso (e non di semplici e singoli reattori visti come monadi isolate dall'ambiente e dai sistemi in prossimità) è stato probabilmente poco sviluppato in passato e ridotto all'utilizzo di semplici formule o codici di moderata accuratezza, per verificare talvolta sbrigativamente i margini di sicurezza rispetto ad eventi naturali magari in linea con il passato storico, ma non ad eventi rari e fuori dai limiti di progetto.

Questa attività è stata descritta nel seguente rapporto:

- RdS/2012/016 Progettazione di massima di simulatori di ingegneria avanzati

D. Attività sperimentali a supporto degli studi di sicurezza

D.1 Verifiche analitiche a supporto di SPES-3, simulatore integrale di SMR

In linea con gli studi già intrapresi nella precedente annualità aventi lo scopo di valutare l'utilizzo del simulatore integrale di impianto SPES-3 per l'investigazione delle problematiche di sicurezza genericamente connesse ai reattori SMR, sono state effettuate da SIET delle verifiche analitiche con il codice RELAP5. Queste verifiche, relative anche ad eventi incidentali di particolare gravità, superiore ai così detti transitori incidentali di progetto fino a considerare uno scenario incidentale analogo a quello verificatosi sui reattori di Fukushima, hanno dimostrato che la risposta dell'impianto SPES-3 sarebbe rappresentativa di quella di un generico impianto SMR. Infatti le caratteristiche di questi reattori, riprodotte sull'impianto (forte accoppiamento primario contenimento, basso rapporto potenza-inventory del refrigerante, utilizzo di sistemi di sicurezza passivi), permettono di affrontare i vari incidente senza particolari conseguenze per l'integrità del reattore.

Gli scenari incidentali analizzati in corrispondenza con quanto previsto sono stati i seguenti:

- rottura della linea superiore EBT (Emergency Boration Tank) in condizioni BDBE (Beyond Design Basis Event);
- rottura singola della linea DVI da 1-inch (1-inch DVI line split break) in condizioni DBE (Design Basis Event);
- incidente di Fukushima (station black-out: loss off-site and on-site AC power)

I risultati di queste analisi sono dettagliatamente descritti nel seguente rapporto:

- RdS/2012/017 SPES3 facility: RELAP5 simulations, from 65% power, of the DBE DVI line split break, BDBE EBT top line DEG break, Fukushima type SBO, for design support

D.2 Prove sperimentali e verifiche analitiche su componenti critici per la simulazione di SMR

Relativamente alla sperimentazione a supporto di componentistica dell'impianto SPES-3 sono state completate le verifiche sulle prestazioni di elementi scaldanti per la simulazione del nocciolo di un reattore modulare di piccola/media taglia. Queste verifiche sperimentali, condotte su un impianto realizzato nel triennio 2006-2008 dell'AdP, hanno avuto per oggetto un fascio di canne scaldanti fornito dalla ditta THERMOCOAX. Tenendo conto delle verifiche effettuate nell'ambito del PAR 2008-09 su canne scaldanti fornite dalla ditta ROTFIL è ora a disponibile un informazione completa per confrontare la funzionalità dei due diversi prototipi di barre sia dal punto di vista elettrico sia da quello meccanico. I risultati di questo confronto saranno utilizzati per procedere all'approvvigionamento del fascio di canne scaldanti nel caso si proceda con la realizzazione del canale di potenza per la facility.

Gli studi effettuati dal CIRTEN per i componenti critici sono proseguite sulle fenomenologie relative a fondo vessel/downcomer del reattore ed al generatore di vapore. A questo scopo sono state utilizzate le attrezzature realizzate nelle precedenti annualità rispettivamente presso l'area sperimentale dello DIMNP dell'Università di Pisa (mock-up del fondo vessel del reattore IRIS) e presso i laboratori SIET (mock-up di generatore di vapore a doppio tubo prototipico).

Per quanto riguarda il il fondo vessel/downcomer l'attività di ricerca è stata focalizzata sulla caratterizzazione e qualifica della fenomenologia del miscelamento termico e del boro nel lower plenum e nel downcomer di reattori ad acqua in pressione di tipo integrato. I dati sperimentali necessari sono stati acquisiti attraverso apposite prove progettate e realizzate sul circuito messo a punto presso l'Università di Pisa. Le prove, che hanno riguardato differenti condizioni operative di intervento delle linee di iniezione del boro nel downcomer stesso, hanno richiesto l'esecuzione di analisi REALP5 per la definizione delle procedure di prova. La simulazione delle fenomenologie di mixing tramite il codice CFD FLUENT è inoltre servita a definire il posizionamento delle termocoppie per la caratterizzazione delle stratificazione termica. L'analisi preliminare delle 6 prove condotte ha permesso di ricavare interessanti indicazioni sulla stratificazione termica nella test section della facility per ottimizzare la procedura sperimentale e migliorare i modelli numerici.

Le attività di ricerca relative a generatori di vapore innovativi hanno riguardato il comportamento di tubi elicoidali in flusso monofase e bifase, e sono consistite nell'effettuazione di prove sperimentali nel mock-up in SIET e nello sviluppo di modelli. Lo sviluppo di modelli si è in particolare basato sulle prove effettuate nelle precedenti annualità circa lo studio delle instabilità termoidrauliche di tipo DWOs (Density Wave Oscillations) e di Leddineng, e lo sviluppo/validazione di modellistica CFD per la simulazione di flusso turbolento in condizioni monofase. Le nuove prove sperimentali sono state effettuate per investigare la sovra-imposizione di instabilità di tipo DWOs e Leddineng a bassa pressione. I risultati sperimentali sono stati interpretati con modelli semplificati sviluppati nelle precedenti annualità dell'AdP. I modelli sviluppati e testati potranno essere utilizzati in future attività di sviluppo di generatori innovativi per la simulazione di differenti geometrie e condizioni termo-idrauliche.

Le diverse attività che fanno parte dell'obiettivo D2 sono descritte nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/018 Verifica sperimentale di prototipi di elementi scaldanti per l'impianto SPES-3 – Barre THERMOCOAX
- RdS/2012/019 Characterization and validation of thermal and boron mixing phenomena in the downcomer and lower plenum of an integrated primary system nuclear reactor
- RdS/2012/020 Rapporto Tecnico sul comportamento di miscele bifase in generatori di vapore a tubi elicoidali con diverse geometrie ed in soluzioni alternative

D.3 Sviluppo strumentazione speciale per impianti sperimentali

Le attività relative alla strumentazione speciale sono state dedicate come già fatto nel corso delle annualità precedenti, allo sviluppo di una strumentazione affidabile per la misura della portata in condizioni bifase su impianti integrali, e nella fattispecie sulla facility SPES3. A questo obiettivo, sotto il coordinamento di ENEA, hanno contribuito SIET e CIRTEN con attività distinte ma complementari per il raggiungimento del risultato finale.

Da parte SIET si è proseguito lo sviluppo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto di miscele bifase acqua-vapore. In particolare, nella presente annualità è stato sviluppato un prototipo adatto ad operare alle condizioni prototipiche delle linee dell'impianto SPES simulanti le rotture: 15 bar e 200 °C, grazie ad una architettura hardware e software migliorata rispetto al precedente prototipo a freddo. Tale prototipo è stato è stato testato con successo sull'impianto prova barre scaldanti che ha permesso di alimentare la sezione di prova con flussi acqua/vapore prototipici. Sul circuito sperimentale sono state effettuate misure di grado di vuoto volumetrico medio, che sono state correlate ai segnali della sonda capacitiva in modo da ottenere un modello predittivo sperimentale con risultati molto soddisfacenti.

In parallelo SIET ha anche individuato gli strumenti più idonei per la realizzazione del set strumentale (SPOOL PIECE) che permetterà la misurazione della portata bifase su SPES3. Infatti, per ridurre l'errore le misure necessarie per poter stimare la portata bifase sono tre: la misura di grado di vuoto, la misura del flusso della quantità di moto e la misura della velocità media della miscela bifase. Mentre per la misura del grado di vuoto della miscela si utilizzerà la sonda ad impedenza sviluppata ad hoc, per le altre misure si sono cercati sul mercato gli strumenti idonei. Sia per il flusso della quantità di moto, sia per la velocità media non sono disponibili strumenti commerciali tali da soddisfare le esigenze. Per la misura del flusso della quantità di moto è stato sviluppato presso la SIET un sistema simile ai drag disk (non più disponibili) che impiega come elemento sensibile un cella di carico a flessione stagna per applicazioni ad alta temperatura. Per la misura della velocità media della miscela si

utilizzeranno i segnali di due strumenti un vortex ed un venturimetro che opportunamente combinati potranno coprire l'ampio campo di velocità atteso durante i transitori incidentali per cui si vuole utilizzare la facility.

Il CIRTEN, nella fattispecie il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, ha dedicato le proprie attività alla caratterizzazione di uno Spool Piece alternativo per la misura della portata massica bifase, costituito da un venturi classico e da un Wire Mesh Sensor. Il circuito disponibile presso il Dipartimento ha consentito di installare il dispositivo su un condotto orizzontale interessato dal deflusso di una miscela aria-acqua in un ampio range di portate. Attraverso l'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello Spool Piece, si è caratterizzata la risposta del dispositivo al deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Questi dati hanno permesso di verificare un modello interpretativo globale per i segnali dello SP con buoni risultati. In particolare per alti valori del titolo e di grado di vuoto, corrispondenti al range di misura di interesse per la facility SPES3, il modello consente di ottenere incertezze sulla stima di titolo e portata di liquido sempre inferiori al 10% e inferiori al 20% nella stima della portata massica della fase aeriforme. Sulla base di questo modello è stata sviluppata una metodologia per l'identificazione del flow pattern che caratterizza il deflusso. Ulteriori analisi sono necessarie per definire l'adeguatezza del venturi per le condizioni di deflusso attese nei transitori e verificare la possibilità di sostituire il WMS con la sonda tomografica sviluppata da SIET.

Per descrivere le attività condotte nell'obiettivo D3 sono stati preparati tre rapporti:

- RdS/2012/021 Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase
- RdS/2012/022 Spool piece per la misura di portata di fluido bifase: misura di quantità di moto e di velocità
- RdS/2012/023 Analisi delle prestazioni di uno Spool Piece, costituito da Venturi classico e Wire Mesh Sensor, in deflusso orizzontale bifase aria-acqua

D.4 Adeguamento dello SPES2 per prove di sicurezza

Questa task è stata dedicata al proseguimento dell'azione iniziata nel PAR 2007 per il recupero dell'impianto SPES-2, costruito nei laboratori SIET negli anni 90 per la simulazione integrale del reattore AP600 e pertanto provvisto dei relativi sistemi di sicurezza passivi. La disponibilità di tale impianto è ritenuto di forte interesse per l'approfondimento di problematiche relative ad una concezione di sicurezza legata a caratteristiche intrinseche e passive propria dei reattori innovativi. Altro motivo di interesse è la possibilità di validare la codicistica per l'assessment della sicurezza nei reattori nucleari a fronte di dati sperimentali relativi a fenomenologie e condizioni termo-idrauliche attese nei reattori LWR innovativi.

La partecipazione della società SIET SpA all'attività è risultata preziosa perché l'approfondita conoscenza dell'impianto risalente ai programmi sperimentali condotti sull'impianto negli anni 80 e 90 ha permesso di valutare la fattibilità di un esperimento relativo alla diluizione del boro in impianti PWR. Per investigare questa problematica di forte rilievo per la sicurezza dei reattori nucleari, come dimostrato dai programmi internazionali a riguardo, nel corso del PAR 2008-2009 erano state effettuate simulazione da parte di ENEA in condizioni di massa ridotta a seguito di un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA). Lo studio effettuato dalla SIET ha riguardato le procedura da seguire per soddisfare i nuovi requisiti di operazione dell'impianto, le operazioni necessaria al rinnovamento del canale di potenza, dei sistemi ausiliari, la strumentazione ed il sistema di acquisizione dati. In parallelo a questo studio di fattibilità SIET ha proseguito l'attività di ripristino dell'impianto in vista della sua futura rimessa in esercizio, effettuando l'installazione e messa in servizio di componenti e strumentazione il cui approvvigionamento era stato anticipato nell'ambito del precedente PAR2008-09.

In questa task ENEA e CIRTEN hanno condotto in collaborazione un'investigazione delle capacità del circuito SPES-2 a simulare eventi incidentali estremi del tipo di quello occorso a Fukushima. A questo riguardo sono stati utilizzati due codici termoidraulici di sistema TRACE (Università di Palermo) e CATHARE (ENEA) per riprodurre il comportamento dell'impianto a fronte di una perdita totale d'alimentazione elettrica (Station Black Out SBO). Il calcolo di transitorio effettuato con il codice TRACE ha mostrato un'evoluzione temporale in accordo con quanto atteso dal punto di vista fisico-ingegneristico e che confermano l'idoneità della facility per questo tipo di simulazioni. E' stata inoltre completata la nodalizzazione dell'impianto tramite l'impiego del codice di calcolo CATHARE. Con tale modello sono state realizzate la fase di regolazione e quella di stabilizzazione dell'intero impianto per riprodurre le condizioni inziale del transitorio di SBO già simulato con TRACE. In futuro è previsto il confronto tra i risultati prodotti dai due codici (code-to-code benchmark) per la definizione delle condizioni di prova.

Le attività qui riassunte sono descritte in dettaglio nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/024 Feasibility study for the execution of a boron dilution test on the SPES-2 facility

- RdS/2012/025 Relazione tecnica su sostituzione strumentazione obsolete ed attività di manutenzione per impianto SPES2
- RdS/2012/026 Analisi preliminari per la simulazione di un incidente tipo Fukushima su SPES2

E. Studi di sicurezza relativi ai depositi di rifiuti radioattivi

E.1 Performance Assessment di Depositi Superficiali e Geologici per il Confinamento di Rifiuti Radioattivi

Sono proseguite le attività di R&S relative ai fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati a un deposito di smaltimento, sia superficiale che geologico. In particolare la modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti, ai fini dell'analisi di sicurezza e "performance assessment" per gli scenari incidentali ipotizzati.

In un primo studio [report RdS/2012/027] si è affrontata la modellazione della migrazione di radionuclidi nelle acque sotterranee, nel contesto degli studi di safety assessment di un deposito superficiale italiano per rifiuti radioattivi di seconda categoria. Il lavoro ha avuto come principale obiettivo il potenziamento delle competenze modellistiche nelle attività propedeutiche alla progettazione e realizzazione del deposito superficiale italiano per i rifiuti radioattivi di seconda categoria. L'obiettivo finale è quello di giungere ad una metodologia consolidata di impostazione del modello, che costituirà la base concreta per attività di performance e safety assessment di depositi reali, al fine di stimare a priori l'impatto dell'opera sull'ambiente e sulla salute umana, indirizzandone anche le caratteristiche progettuali. Nonostante alcune ipotesi semplificative, il caso studio ha permesso una valutazione quantitativa della dinamica dei radionuclidi nei terreni circostanti il deposito e della dose da ingestione di acqua potabile prelevata da un acquifero ubicato presso il sito di studio.

In un secondo studio [Report RdS/2012/028], in continuità con gli studi impostati negli anni precedenti per i depositi superficiali, è stato avviato il lavoro di sviluppo di conoscenze, competenze e strumenti modellistici e computazionali per l'analisi del rischio di un deposito geologico per il confinamento di rifiuti radioattivi ad alta attività e/o lunga vita, partendo dalla metodologia e dalle competenze consolidate per i depositi superficiali. In particolare, sono stati avviati i seguenti lavori:

i) il recupero e la sintesi delle informazioni esistenti a livello nazionale ed internazionale sui depositi geologici profondi per rifiuti radioattivi ad alta attività e vita lunga;

ii) lo sviluppo del contesto metodologico di performance assessment probabilistica specifico per un deposito geologico profondo, con particolare attenzione alla definizione delle necessarie ed adeguate procedure di analisi di sensitività e delle incertezze e loro verifica con riferimento ai modelli disponibili grazie agli sviluppi delle precedenti annualità.

Tornando al contesto dei depositi superficiali è stato poi effettuato uno studio per valutare gli effetti strutturali indotti dall'impatto di un aereo civile su un deposito di rifiuti radioattivi di bassa attività di tipologia simile al deposito di El Cabril. I risultati ottenuti sono stati analizzati per verificare i margini di sicurezza degli impianti di smaltimento di questo tipo.

Infine altre iniziative hanno riguardato la partecipazione dell'ENEA alla piattaforma tecnologica "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste" (IGD-TP) che raggruppa i principali portatori di interessi nello smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita. In particolare nel rapporto viene riportato lo stato dei lavori della piattaforma presentato al secondo Exchange Forum, tenutosi il 29 novembre 2011 ad Helsinki, e relativo follow-up. Sono preliminarmente esposte anche alcune proposte progettuali scaturite da tale Forum per attività di R&D previste per il prossimo futuro e inserite nel Deployment Plan.

Le attività sono descritte in dettaglio nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/027 Applicazione modellistica mediante il codice AMBER per la safety assessment di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi di seconda categoria;
- RdS/2012/028 Performance Assessment di Depositi Geologici per il confinamento di rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita e relativa modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive;
- RdS/2012/03: Preliminary evaluation of an aircraft impact on a surface RWs disposal facility;
- RdS/2012/029: Partecipazione a IGD-TP – Stato dei lavori e prospettive per le future attività di R&S.

E.2 Monitoraggio dei depositi di rifiuti radioattivi

Sono proseguite le attività, avviate con il PAR 2008-09, inerenti le metodologie e le tecniche più adeguate per la caratterizzazione dei siti candidati e per il monitoraggio ambientale dei siti stessi durante la fase di sorveglianza istituzionale del deposito.

In un primo rapporto ENEA-CIRTEN [Report RdS/2012/031] vengono delineati gli aspetti propedeutici allo sviluppo di un programma di monitoraggio ambientale relativo ad un deposito di rifiuti radioattivi superficiale; questi aspetti includono la valutazione di impatto ambientale e la Safety Assessment. Viene inoltre definita la strategia per affrontare il tema del monitoraggio di un deposito di rifiuti radioattivi quali i differenti obiettivi del monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione del sistema di smaltimento, le matrici ambientali che è necessario monitorare ed i punti di campionamento essenziali da predisporre. La definizione di tali procedure e parametri viene elaborata in base a normative internazionali IAEA e alle esperienze già sviluppate in questo settore in ambito europeo ed internazionale. Vengono infine approfondite le proprietà di alcuni radionuclidi: 129I, 99Tc, 14C e 3H, gas nobili, i quali presentano elevata mobilità che può risultare importante, in fase di monitoraggio ambientale, per valutare eventuali fuoriuscite dal deposito. I rapporti isotopici con cui sono presenti nell'ambiente e la loro esigua concentrazione rendono la loro rivelazione un' attività tecnicamente difficile ma di primaria importanza ai fini del monitoraggio.

In un secondo rapporto [Report RdS/2012/033], a supporto del programma di monitoraggio sopra delineato, viene effettuato un confronto tra metodiche radiometriche e di spettrometria di massa classiche e le tecniche avanzate come l'AMS e la spettrometria laser ad alta risoluzione, per l'identificazione ed analisi degli isotopi del carbonio, idrogeno. Una parte importante del lavoro affidato ai laboratori dedicati al monitoraggio dei depositi per i rifuti radioattivi prevede la misura sia degli isotopi stabili che di quelli radioattivi utilizzando metodi che siano accurati e che abbiano elevata sensibilità. Nel rapporto vengono analizzate e confrontate tecniche radiometriche, di spettroscopia ottica e di spettrometria di massa per l'analisi degli isotopi del carbonio e dell'idrogeno e dei gas nobili.

In parallelo sono state effettuate attività di approfondimento dei processi di trasporto dei radionuclidi attraverso le barriere protettive e gli ambienti idrici sub-superficiali e profondi:

Sono stati sviluppati alcuni codici di calcolo relativi al trasporto e alla migrazione di radionuclidi nelle matrici ambientali e relativi a fenomeni geochimici. Di questi software sono state riportate le caratteristiche fondamentali, delineando i fenomeni che possono essere studiati applicandoli. Si riporta una classificazione per focalizzare l'attenzione sul fenomeno studiato da questi codici (trasporto di inquinanti o geochimica) e sull'approccio applicato (deterministico o probabilistico). Viene inoltre riportato un esempio applicativo dei codici Hydrus 1D ed Amber relativamente ad un sito analizzato dall'ENEA in passato come caso studio di ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi.

È stato infine affrontato lo studio del trasporto e della destinazione degli inquinanti radioattivi nel suolo e sottosuolo tramite l'utilizzo della piattaforma software FRAMES ed in particolare del modulo. La prima parte del rapporto è stata dedicata alla trattazione della radioattività, analizzandone gli aspetti generali e soffermandosi sul concetto di rifiuto radioattivo e sulla gestione e sullo smaltimento dello stesso. Si sono poi analizzati i principali modelli di trasporto per la valutazione del destino dei contaminanti nell'ambiente, fase complessa nella valutazione del rischio o in qualsiasi altra valutazione di impatto ambientale. Lo studio complessivo del problema ha richiesto la suddivisioni in tre momenti distinti, che si riferiscono al modello concettuale di analisi di rischio.

Le attività sono descritte in dettaglio nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/031 Il monitoraggio ambientale nei depositi di rifiuti radioattivi per le valutazioni di impatto ambientale e di Safety Assessment
- RdS/2012/033 Monitoraggio del deposito dei rifiuti radioattivi: Confronto tra metodiche analitiche radiometriche, spettrometriche e spettroscopiche classiche ed avanzate, per l'identificazione ed analisi degli isotopi mobili
- RdS/2012/032 Trasporto e migrazione dei radionuclidi dei depositi di rifiuti radioattivi: strumenti per la simulazione e il monitoraggio ambientale
- RdS/2012/034 Studio del trasporto e diffusione di inquinanti radioattivi nel suolo e sottosuolo.

E.3 Caratterizzazione dei rifiuti radioattivi

Durante questa annualità sono state affrontate due linee di attività riguardanti la caratterizzazione dei rifiuti radioattivi sia tramite tecniche di misura distruttive che non distruttive: lo studio degli Scaling Factor per la caratterizzazione di rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rivelabilità (HTMR) e lo studio di rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He.

Radionuclidi di difficile rivelabilità. La metodologia dei Fattori di Correlazione (Scaling Factors) viene impiegata per determinare l'attività dei radionuclidi HTMR usando correlazioni fra loro e nuclidi chiave (KN, key nuclides) scelti fra i radionuclidi facili da misurare ETMR. Nel corso di questa annualità, avendo la disponibilità di un certo numero di campioni di grafite irraggiata provenienti dalla Centrale di Latina, sono state effettuate campagne di misura sperimentali con lo scopo di migliorare l'affidabilità degli scaling factor ipotizzati nella precedente annualità per i radionuclidi HTMR ^{55}Fe e ^{63}Ni.

Su ciascuno dei campioni sono state effettuate analisi non distruttive (spettrometria γ) per la misura del key-Nuclide ^{60}Co e, dopo l'opportuno trattamento chimico, i due HTMR ^{55}Fe e ^{63}Ni sono stati quantificati mediante un sistema LSC (Liquid Scintillation Counting). I risultati ottenuti, opportunamente elaborati, hanno permesso una trattazione statistica adeguata per la validazione dei risultati ottenuti. Per estendere la tipologia di campioni su cui effettuare i test, sono stati richiesti alla SOGIN alcuni campioni di acciai irraggiati provenienti dalla Centrale di Latina. Anche su questi campioni sono stati ipotizzati e verificati gli Scaling Factor con le stesse procedure utilizzate per la grafite.

Rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He. L'obiettivo di questa attività è analizzare le potenziali alternative ai rivelatori proporzionali ad ^{3}He nell'ambito della caratterizzazione radiologica di manufatti contenenti rifiuti radioattivi □-contaminati.

Poiché i boron-coated sono gli unici rivelatori di neutroni che potrebbero sostituire gli ^{3}He così come sono, sono state approfondite le tematiche legate all'ottimizzazione di sistemi di misura costituiti da rivelatori di tale tipologia. E' stata sviluppata una metodologia di simulazione dei rivelatori boron-coated commerciali, successivamente validata sperimentalmente con alcuni rivelatori acquisiti appositamente. Tale metodologia è stata poi applicata per la progettazione ed ottimizzazione di una testa di misura 4□ per fusti contenenti rifiuti radioattivi.

Fra i rivelatori non direttamente sostituibili agli ^{3}He, sono risultati di particolare interesse i rivelatori ad emulsioni surriscaldate, sviluppati presso l'Università di Pisa: il sistema di rivelazione messo a punto in questa annualità è stato testato presso i laboratori della stessa Università.

Le attività sono descritte in dettaglio nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/217 Metodologie di caratterizzazione radiologica per rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rivelabilità
- RdS/2012/218 Studio di rivelatori di neutroni "Boron Coated" come alternativi ai contatori proporzionali a 3He.

E.4 Tecniche innovative di trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi

A valle degli studi effettuati nelle annualità precedenti sulle tecniche di condizionamento per i rifiuti generati dai processi pirometallurgici, con riferimento soprattutto a quelli salini (cloruri) che provengono dallo step di elettroraffinazione, si è proceduto ad una verifica sperimentale di due distinti processi messi a punto negli USA da Argonne National Laboratory. Entrambi i processi, conosciuti come Hot Isostatic Pressing (HIP) e del Pressureless Consolidation (PC), partono dalla zeolite 4A, nella quale viene fatto percolare il sale a 500°C, per poi trasformarla in sodalite, un minerale presente in natura che contiene cloro.

Le attività sperimentali svolte hanno riguardato sia la verifica del procedimento adottato negli USA, sia una modifica sostanziale dello stesso, che prevede la sintesi della sodalite attraverso la nefelina. Tale procedimento, se applicato su scala industriale, avrebbe innegabili vantaggi, essendo più semplice e meno costoso. Contemporaneamente è stata presa in esame la tecnologia del "crogiolo freddo" per il trattamento dei rifiuti radioattivi.

La seconda parte del lavoro è stata dedicata ad uno studio delle interazioni tra il rifiuto condizionato in matrice di sodalite, con e senza l'aggiunta di vetro borosilicato, ed il terreno, attraverso un'ampia analisi dell'influenza del pH sulla lisciviazione delle specie chimiche presenti.

Le attività svolte in collaborazione tra ENEA e CIRTEN (Politecnico di Milano) sono descritte nel rapporto:

- RdS/2012/219 Condizionamento di rifiuti radioattivi in matrici vetro-ceramiche e studio delle interazioni rifiuto-terreno

LINEA PROGETTUALE 3: REATTORI DI IV GENERAZIONE

La linea progettuale LP3, reattori di IV generazione, mantiene e sviluppa ulteriormente gli elementi fondamentali che costituivano anche i PAR precedenti dello stesso triennio, in particolare il PAR 2008-2009.

La proposta è stata pertanto articolata sulle seguenti macro-attività:

- Progettazione di sistema,
- Materiali strutturali e fabbricazioni
- Termoidraulica del refrigerante
- Analisi di sicurezza.

A. Progettazione di Sistema

A.1 Sviluppo e validazione modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica di nocciolo LFR

Si è provveduto alla ulteriore implementazione di modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica spaziale di nocciolo, con particolare riguardo all'applicazione di questi su sistemi refrigerati a piombo liquido.

In particolare, è proseguita l'attività di sviluppo di un codice di neutronica e termoidraulica accoppiate (FRENETIC) finalizzato all'analisi cinetica spaziale di un nocciolo LFR. Entrambi i moduli di neutronica e termoidraulica del codice sono stati preliminarmente validati indipendentemente assumendo come condizioni di riferimento problemi relativamente semplici che presentano una soluzione analitica. Si è successivamente verificata la capacità del codice di elaborare soluzioni accoppiate di NE/TH verificando la capacità del codice di risolvere problemi di "criticality search". Infine l'indipendenza della soluzione dalla griglia spaziale e dal time step adottato è stata verificata mediante sperimentazione computazionale. L'estensione dei modelli neutronici per includere anche capacità predittiva su transitori 3D e il perfezionamento dei modelli termoidraulici mediante accoppiamento con risultati sperimentali è una attività avviata e che una volta completata permetterà l'utilizzo del codice come strumento di progettazione e verifica dei sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR). Per quanto riguarda i codici di neutronica si è dato avvio ad una sistematica analisi di validazione e quindi di sviluppo del codice ERANOS, in particolare in rapporto al suo utilizzo sulla base della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) per i calcoli perturbativi generalizzati. In questa prima fase di attività sono stati eseguiti calcoli sistematici della variazione di quantità integrali importanti per i reattori veloci (quali l'effetto di vuoto del refrigerante), a seguito di variazioni parametriche (sezioni d'urto e densità di elementi costitutivi). I risultati ottenuti con la metodologia perturbativa sono stati quindi confrontati con metodi di calcolo diretti, cioè basati sul calcolo diretto dei flussi perturbati, utilizzando sia la modalità di calcolo in diffusione che quella in trasporto. E' stata verificata la convergenza dei risultati dei calcoli perturbativi on quelli diretti al diminuire dell'entità della perturbazione. Ciò dimostra la validità della modalità perturbativa GPT implementata nel codice.In previsione dello sviluppo del codice ERANOS per analisi perturbative in campi non lineari, quale quello accoppiato neutroni/nuclidi, di interesse per studi relativi alla evoluzione del nocciolo durante il burn-up, è stata messa a punto una procedura di calcolo atta a poter calcolare le funzioni importanza, in questo caso dipendenti anche dal tempo, che entrano nelle formulazioni perturbative. In questa prospettiva, è stato definito e svolto un calcolo di riferimento, consistente in cinque step temporali di evoluzione del reattore ELSY in geometria esagonale, per una durata complessiva del ciclo di cinque anni.

Relativamente alla applicazione della metodologia GPT per l'analisi di sensitività di parametri neutronici di interesse per la caratterizzazione del comportamento neutronico statico di noccioli critici (LFR) e sottocritici (ADS) raffreddati a piombo, si è analizzato, attraverso calcoli di simulazione numerica, la rilevanza di misure di quantità integrali in reattori veloci sperimentali (per esempio, l'effetto di vuoto del refrigerante) in rapporto ad analoghe quantità relative al reattore di riferimento. Per lo studio sono stati presi in considerazione il reattore GUINEVERE, come rappresentativo di una facility sperimentale, e il reattore veloce refrigerato a piombo ELSY come sistema di riferimento. Per lo studio sono state utilizzate le metodologie GPT (Generalised Perturbation Theory) disponibili nel codice di calcolo ERANOS. L'analisi è consistita nel calcolo dei coefficienti di sensitività relativi ai vari casi studiati. Tali coefficienti sono necessari per determinare i coefficienti di correlazione tra quantità integrali analoghe nei due sistemi. I risultati ottenuti sono indicativi di una buona correlazione (coefficiente 0,81) degli effetti di reattività relativi a variazioni della sezione d'urto di cattura dell'uranio-238, significativa anche in relazione all'effetto Doppler, mentre il coefficiente di correlazione tra i due sistemi relativo all'effetto di vuoto del refrigerante si limita a 0,39. Ciò si può spiegare considerando che i due sistemi differiscono significativamente per le dimensioni del nocciolo. Nel reattore GUINEVERE, a taglia ridotta, prevalgono infatti gli effetti (negativi per la reattività) del leakage dei neutroni, mentre in ELSY, di dimensioni decisamente maggiori, prevalgono gli effetti (positivi) relativi allo spettro neutronico.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/035 Sviluppo di un codice di cinetica spaziale di nocciolo per sistemi LFR
- RdS/2012/036 Attività di sviluppo, validazione e benchmarking del codice ERANOS
- RdS/2012/037 Attività di analisi di sensitività con metodologie GPT applicata a noccioli critici e sottocritici raffreddati a piombo

A.2 Sviluppo e validazione di codici per la termoidraulica di sistemi LFR

Le attività relative allo sviluppo di modellistica per la simulazione termoidraulica di reattori refrigerati a piombo erano inizialmente previste su due linee.

La prima linea era relativa allo sviluppo e validazione del codice di sistema CATHARE-2 che nell'ambito delle precedenti annualità è stato adattato per le analisi di sistema e di sicurezza degli LFR. Tale obiettivo, che si inseriva nell'ambito della collaborazione ENEA-CEA, non è stato perseguito vista la mancanza di supporto da parte del CATHARE-Team (CEA), necessario per la implementazione dei modelli che permettano di simulare l'iniezione di incondensabili in metallo liquido durante gli esperimenti di gas-lift. Vista inoltre la mancanza di nuovi dati sperimentali sulla facility NACIE (in fase di up-grade) utilizzabili per la validazione del codice si è preferito dirottare le risorse allocate inizialmente su questo obiettivo, vero le attività relative all'ottimizzazione ed estensione dell'utilizzo del codice di calcolo FEM-LCORE.

Il codice FEM-LCORE permette una descrizione 3-D del nocciolo del reattore a piombo mediante un approccio a sistemi porosi. Il codice, integrato nella piattaforma SALOME (che ne permette il lancio e la configurazione tramite SALOME-GUI), ha permesso di studiare alcune condizioni incidentali relative al core di un LFR, studiando in particolare i transitori incidentali relativi al parziale flow-blockage di un elemento di combustibile. Si è valutato inoltre come migliorare la modellazione fisica, mediante un modello a strutture porose, e mediante l'implementazione di più accurati modelli di turbolenza, del plenum superiore al core. A tale scopo bisognerà accoppiare i risultati del calcolo con i risultati ottenuti da codici di calcolo validati e/o da dati sperimentali. Il calcolo parallelo è stato migliorato applicando il metodo delle celle fantasma alle condizioni al contorno dei sotto-domini che discretizzano il sistema. Si è studiata inoltre la possibilità di utilizzare architetture di calcolo ibride che accoppino il calcolo parallelo su GPUs (Graphical Processor Unit) con CPUs multi-core. Un GPU può infatti contenere diverse centinaia di processori che possono utilizzarsi per accelerare il calcolo fluidodinamico. Infine si è valutata la possibilità di accoppiare il codice FEM-LCORE con un codice di sistema quale CATHARE. Con tale approccio il core e l'upper plenum vengono simulati con una approccio 3D a mezzo poroso nel codice FEM-LCORE, mentre il resto del sistema (sistema primario) mediante un approccio 1D con il codice CATHARE.

Relativamente allo sviluppo e validazione di codici di termoidraulica di sistema, il codice FRENETIC (vedi obiettivo A1) è stato preliminarmente validato, nella sua componente termoidraulica. Al contrario dei classici codici termoidraulici, FRENETIC permette di accoppiare un modulo di termoidraulica con un modulo di neutronica, consentendo di supportare in maniera efficace e consistente la progettazione di sistema e le relative verifiche di sicurezza di un reattore LFR con elementi di combustibile esagonali incamiciati. Obiettivo della attività è stata la validazione del modulo termoidraulico mediante l'utilizzo dei dati sperimentali disponibili dall'esperimento ICE realizzato sulla facility CIRCE (ENEA). L'attività ha permesso di evidenziare come il modulo termoidraulico predica molto bene il profilo di temperatura nel refrigerante, mentre permangono ancora alcune discrepanze sulla valutazione della temperatura di guaina, che rimane strettamente correlata alla valutazione del coefficiente di scambio termico convettivo nel fuel bundle, che avviene attraverso modelli semi-empirici e/o attraverso simulazioni CFD realizzate ad hoc.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/039 FEM-LCORE code: parallelization, turbulence models and code integration
- RdS/2012/040 Validation of a 1D+2D thermal-hydraulic module against Circe experimental data

A.3 Concettualizzazione del DEMO LFR

Scopo dell' attività è stata una nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO che verta sugli obiettivi di dimostrazione della fattibilità della filiera, attività inscrivibile nella roadmap europea, coerentemente con i risultati evidenziati dalle analisi condotte precedentemente. Il lavoro descrive quindi le considerazioni, e le analisi neutroniche, termoidrauliche e termomeccaniche preliminari, svolte a supporto della concettualizzazione del nocciolo di una nuova configurazione di un reattore. Partendo dalla configurazione di DEMO, analizzata nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma, sono stati analizzati i punti critici riconosciuti in tale configurazione - derivanti principalmente dalla volontà di ottenere una macchina capace di fungere al contempo da dimostratore e facility di irraggiamento - e modificati i principali parametri di nocciolo, giungendo così alla configurazione qui proposta per AFRODITE (Advanced lead-cooled Fast Reactor Oriented to the Demonstration of Innovative Technologies). Dalle analisi preliminari condotte, di cui sono stati riportati i principali risultati, la

configurazione proposta sembra soddisfare tutti gli obiettivi di dimostrazione, rispettando al contempo tutti i vincoli fissati ex-novo, coerentemente con l'obiettivo di semplificare le richieste tecnologiche per accelerare la realizzabilità del reattore. Si riconosce ad ogni modo la necessità di approfondire le verifiche sulla configurazione qui proposta - includendo nello studio anche analisi dei principali transitori operativi ed incidentali caratteristici per reattori refrigerati a piombo -, arrivando ad una completa caratterizzazione del nocciolo di AFRODITE ed ultimando così il progetto concettuale dello stesso.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/041 Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico e termomeccanico

A.4 Reinterpretazione campagne sperimentali TAPIRO in appoggio alla progettazione dei sistemi

Le attività di Ricerca e Sviluppo richiedono una verifica di scopo delle misure e degli esperimenti proposti affinché le attività siano rappresentative dei requisiti tecnologici, politici ed economici richiesti. L'attività del presente obiettivo, anche a seguito degli eventi di Fukushima che ha spostato le attività di R&S verso i sistemi nucleari di quarta generazione, e in Italia su quelli refrigerati a piombo, è consistita nel fornire una reinterpretazione della campagna sperimentale effettuata negli anni '80 sul reattore veloce TAPIRO da ENEA e SCK-CEN. A tal fine è stato costruito un modello di simulazione Monte Carlo (MCNPX) del reattore TAPIRO su cui sono state riprodotte una serie di misure (traverse di fissione e di reazioni di cattura) nei canali sperimentali Diametrale, Radiale 1 e Tangenziale. Sono stati sottoposti a confronto anche i dati di reattività delle barre di controllo e la riserva di reattività del sistema. L'accordo delle stime Monte Carlo con le misure sperimentali è generalmente buono e permette di considerare il modello di calcolo neutronico di TAPIRO come validato. Questo permetterà di progettare esperienze di supporto allo sviluppo di LFR, da tenere in TAPIRO, che siano rappresentative del sistema sotto studio, tagliando costi di progettazione e realizzazione.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/042 Reinterpretation of the Late SCK-CEN/ENEA Experimental Neutronic Campaign on TAPIRO Fast Reactor with MCNPX Monte Carlo Transport Code

B. Materiali Strutturali

B.1 Qualifica materiali strutturali ricoperti

Attualmente uno dei maggiori punti critici per lo sviluppo e implementazione dei sistemi LFR è la individuazione di appropriati materiali strutturali capaci di operare in piombo (altamente corrosivo poiché tende a dissolvere il Fe e gli elementi di lega Cr e Ni) ad elevata temperatura e ad elevato tasso di irraggiamento (es. fuel cladding).

L'approccio europeo per molti anni è consistito nello sviluppare e quindi qualificare nuovi materiali strutturali (acciai F/M, ODS) che fossero capaci di assolvere a tale funzioni. Tale approccio ha dimostrato però una forte debolezza. Infatti le attività di sviluppo e qualifica di nuovi materiali strutturali richiedono forti investimenti sia in termini economici che temporali. Prima che un nuovo acciaio possa considerarsi qualificato come elemento strutturale per il fuel caldding occorre che ne venga caratterizzato il comportamento a swelling, creep-termico, creep-neutronico, infragilimento neutronico, FCCI (fuel coolant chemical interaction), FCMI (fuel coolant mechanical interaction), etc.. Tali attività, oltre a richiedere la disponibilità di una facility di irraggiamento (attualmente sono pochissime le facility a flusso veloce disponibili), richiede una sperimentazione non inferiore ai 15-20 anni. Inoltre, l'aver intrapreso la via degli acciai F/M, che presentano un'ottima resistenza a swelling, ha aperto nuove problematiche legate al fenomeno del LME (liquid metal embrittlement) e del creep termico, problematiche assolutamente trascurabili sugli acciai austenitici. Vi è infine da considerare che fino ad oggi gli studi sulla corrosione in piombo degli acciai F/M e ODS ha dimostrato che il loro comportamento non è dissimile (spesso è peggiore) da quello di un acciaio austenitico.

In questo contesto, e vista la roadmap europea relativa allo sviluppo e implementazione dei sistemi LFR, ENEA e Ansaldo nucleare hanno promosso un cambio di strategia, in sinergia con quanto proposto da SCK-CEN per MYRRHA (ADS) e CEA per ASTRID (SFR). L'approccio attuale per il DEMO-LFR prevede infatti l'utilizzo di materiali strutturali già qualificati per applicazioni nucleari in reattori veloci (tipicamente acciai austenitici della famiglia dell'AISI 316), e lo sviluppo di sistemi di protezione contro la corrosione in piombo.

Attualmente l'acciaio di riferimento per il fuel cladding proposto da ENEA per il DEMO-LFR (ALFRED) è il 15-15 Ti mod (Si). Tale acciaio, sviluppato e qualificato dal CEA per i reattori a sodio (per il fuel e il fuel cladding sono moltissime le sinergie tra i sistemi a sodio e quelli a piombo) richiede comunque di essere qualificato in piombo,

specialmente in termini di corrosione. Altri materiali strutturali da considerarsi sono l' AISI 316L per il vessel e gli internals, e il T91 (F/M) per le scatole dell'elemento di combustibile e il generatore di vapore.

Per incrementare le caratteristiche di resistenza alla corrosione dei materiali strutturali proposti quando operanti in piombo fluente ad elevate temperature, si è provveduto a sviluppare e realizzare, in collaborazione con CSM Spa, ricoprimenti di Fe-Al, Fe-Cr-Al, TiN mediante tecnica PVD (Physical Vapor Deposition). L'idea base è quella di creare una barriera altamente protettiva fra il substrato strutturale e il piombo fluente.

L'obiettivo dell'attività è stato quindi parzialmente rimodulato mediante l'approvvigionamento dei seguenti materiali:

1. Acciaio austenitico 15-15 Ti mod(Si) in piastre da spessore 15 mm (1 t). L'acciaio non disponibile in commercio è stato appositamente realizzato e preliminarmente qualificato per ENEA dalla OCAS NV.
2. Acciaio F/M T91 in piastre da 15 mm (2 t). Acciaio commerciale acquisito da ENEA.
3. Acciaio austenitico EP302 in piastre da 15 mm (100 kg). Acciaio prototipico di concezione russa e proposto come materiale ad elevata resistenza alla corrosione in piombo. E' stato realizzato e preliminarmente qualificato per ENEA da CSM Spa.

Successivamente, utilizzando i substrati sopra menzionati, si è provveduto alla preparazione e realizzazione di campioni (>1000) di diversa tipologia, con e senza ricoprimento protettivo, da testare presso i laboratori ENEA come segue:

- prove di flessione a 3 punti;
- prove di trazione a 550 °C;
- prove di creep-rupture in piombo;
- prove di corrosione in piombo stagnante;
- prove di corrosione in piombo fluente;
- prove di grid-to-rod fretting.

Tutti i test saranno realizzati sia con alto che basso tenore di ossigeno disciolto nel piombo, permettendo di discriminarne l'effetto sulla resistenza a corrosione dei materiali strutturali, con e senza ricoprimento. Il tenore di ossigeno infatti influisce sulla auto-passivazione degli acciai (formazione di magnetite e/o spinello) e dei coating protettivi (formazione allumina).

A completamento di quanto descritto e per una completa caratterizzazione dei coating sviluppati, si sono realizzati degli elementi scaldanti con elevata densità di potenza (fino ad 200 kW/m^2) e con ricoprimenti a base di FeAl, al fine di simulare il reale comportamento di un fuel pin (generazione di potenza interna) operante in metallo liquido fluente ad una temperatura massima di 480°C, sia in regime stazionario che di transitorio operazionale.

Infine, per la caratterizzazione dei coating in termini di usura/erosione, è stata progettata da ENEA e successivamente realizzata una macchina per test di Grid-to-Rod Fretting, capace di simulare le condizioni operative tipiche dell'accoppiamento barretta-griglia spaziatrice nell'elemento di combustibile di un sistema LFR.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/043 Ricoprimenti per materiali strutturali per sistemi nucleari refrigerati a piombo
- RdS/2012/044 EP302 Stainless Steel Procurement
- RdS/2012/045 15x15 Ti production and procurement
- RdS/2012/046 Fornitura macchina per prove di fretting GIORDI

B.2 Sviluppo coating in FeAl e TiN

Oltre alla caratterizzazione dei coating a base di FeAl e TiN già disponibili sul mercato e oggetto del precedente obiettivo, si è realizzata una intensa attività di ricerca e sviluppo, su scala laboratorio, al fine di identificare nuove tipologie di coating che possano meglio rispondere alle esigenze tipiche dei sistemi nucleari refrigerati a piombo.

In particolare, in collaborazione con l'Università di Roma di Tor Vergata, si è provveduto alla caratterizzazione microstrutturale, morfologica e meccanica di rivestimenti di TiN, FeAl [Fe(67wt%)Al(33wt%)] e FeCrAl (FeCr(18-20wt%)Al(8-10wt%)], depositati su quattro diversi tipi di substrati, due ferritici (i.e. P91 e 441) e due austenitici (i.e. 304 e 316). Tali rivestimenti sono stati oggetto di un'ampia e completa campagna sperimentale principalmente volta a investigare la natura dei rivestimenti prodotti, la loro morfologia, microstruttura e adesione al substrato. A tale scopo i campioni forniti sono stati sottoposti a misure di diffrazione a raggi X (XRD) per identificare le fasi cristalline presenti e determinarne la dimensione media dei cristalliti, osservazione al microscopio elettronico a scansione (FEG-SEM) per investigarne la morfologia, l'omogeneità, l'uniformità e stimarne lo spessore, a microanalisi di spettroscopia a dispersione di energia (EDS) per valutarne qualitativamente

la composizione chimica e la distribuzione degli elementi costituenti, test di bending a tre punti per stimarne l'adesione al substrato sottostante. Sono state, inoltre, studiate dal punto di vista termico e microstrutturale le sorgenti FeAl e FeCrAl utilizzate per le deposizioni mediante tecnica PVD, al fine di dimostrarne e confermarne la composizione e purezza. Sulla base dei risultati collezionati, è stato possibile concludere che:

- la deposizione di rivestimenti TiN è confermata sia da misure XRD sia da microanalisi EDS. I coating prodotti risultano omogenei e uniformi, caratterizzati dalla presenza di circoscritte difettosità, quali droplets e pin-holes. Prove di flessione a tre punti hanno rilevato la capacità di preservare un buono stato di integrità strutturale, indipendentemente dal substrato e dallo spessore di partenza del rivestimento;
- film monofasici di FeAl e FeCrAl sono stati depositati sui quattro substrati, come dimostrato da misure di diffrazione a raggi X e microanalisi EDS. Sono stati osservati, in tutti i casi, film rugosi e ricchi di droplets. L'utilizzo di una bassa temperatura di deposizione potrebbe avere comportato una formazione di aggregati di macrogocce invece che di una crescita di un film continuo e omogeneo. Le sezioni dei provini sottoposti a prova di flessione a tre punti, osservate al SEM in corrispondenza della mezzeria (ovvero della zona sottoposta a freccia massima), mostrano danneggiamento esteso lungo l'intero perimetro con presenza di frammenti sparsi e incipiente distacco del rivestimento nella zona dell'estradosso del provino, ovvero quella sottoposta a trazione.

L'analisi dei risultati ottenuti e di dati di letteratura suggeriscono di focalizzare l'attività sperimentale futura principalmente sull'ottimizzazione delle condizioni di deposizione al fine di ottenere rivestimenti più omogenei e di incrementarne l'adesione al substrato.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nel rapporto:

- RdS/2012/047 Caratterizzazione di rivestimenti PVD di TiN, FeAl, FeCrAl su substrati metallici

B.3 Prove di fabbricabilità per sviluppo elemento di combustibile LFR

Nell'ambito delle attività di progettazione di elementi di combustibile innovativi per sistemi LFR si è reso necessario associare alle attività progettuali anche studi approfonditi di fabbricabilità delle soluzioni proposte.

La progettazione meccanica dell'elemento di combustibile di un sistema LFR presenta infatti problematiche progettuali non comuni ai sistemi LWR e/o SFR, collegate alla spinta di galleggiamento, al corretto distanziamento tra pin, agli effetti di fretting, ai rischi di ostruzione e soprattutto alla necessità di garantire il raffreddamento dell'elemento anche in caso di arresto della macchina di refuelling.

L'adozione di materiali e di specificità progettuali atte a risolvere le problematiche menzionate, è strettamente connessa alla fabbricabilità dei particolari proposti.

A tale scopo ENEA ha elaborato una specifica tecnica relativa allo studio di fattibilità di alcuni dettagli di elementi di combustibile secondo due distinti progetti concettuali. Il primo è un fascio di barrette con guaina con una disposizione su reticolo quadrato mantenuto da griglie spaziatrici senza il supporto strutturale di una scatola esterna. Questa opzione prevede barrette "vented" ovvero liberate dalla presenza di "gas di fissione" interno. La connessione particolare delle singole barrette alla griglia di piede necessita una verifica preliminare della sua fattibilità con capacità di tenuta.

Il secondo studio verte sul concetto di elemento di combustibile a sezione esagonale con scatola e griglie spaziatrici previsto attualmente nel progetto dimostrativo di reattore a piombo ALFRED. In particolare lo studio prende in esame il concetto di realizzazione delle griglie spaziatrici e la fattibilità del montaggio di insieme delle barrette del fascio all'interno della scatola.

Partendo dalle specifiche ENEA relative al core ALFRED ed alle geometrie suggerite per le griglie spaziatrici, e basandosi sia sull'esperienza maturata in ambito nucleare con la realizzazione di diverse ricariche per centrali nazionali ed estere, nonché per il reattore Superphenix (elementi esagonali freddi), FN Spa ha individuato la migliore sequenza per la composizione del fascio e per il suo inserimento nel tubo di contenimento esagonale.

Sia per la composizione del fascio con le relative griglie spaziatrici sia per il suo inserimento nel tubo esagonale, si è pensato di utilizzare un banco opportunamente strumentato per poter operare anche in remoto (data la presenza di materiale radiogeno all'interno delle barre) ed in grado di lavorare sia in assetto orizzontale (composizione del fascio e collocamento in asse del fascio e del tubo) ed in verticale (inserimento del tubo sul fascio).

Relativamente all'impiego di elementi di combustibile quadrati "vented" è stata ideata una soluzione innovativa che non prevede l'estensione della barretta combustibile per contenere i gas di fissione, ma il rilascio dei prodotti gassosi verso volumi chiusi sul prolungamento superiore dell'elemento di combustibile ad una distanza di circa un metro dalla zona attiva.

Questa soluzione richiede un collegamento a tenuta (dei prodotti di fissione, inclusi quelli gassosi) fra un'estremità forata della barretta combustibile ed il suo supporto. Si presentano quindi due ordini di difficoltà per detti collegamenti, in quanto sono da realizzare in spazi limitati (i passi tra le barrette sono dell'ordine di pochi millimetri) e perché devono, ovviamente, essere di alta qualità per garantire la tenuta anche a seguito di transitori termici e di irraggiamento sotto alto flusso neutronico veloce. L'ENEA, a titolo preliminare, per tali collegamenti ha individuato tre possibili soluzioni che consistono in: saldatura, tipo a rivetto, filettatura a tenuta di gas.

Partendo da queste indicazioni, FN ha sviluppato lo studio del collegamento in tre modalità diverse, saldatura, tipo ad "imbutitura" (con punta a frizione), e filettatura con guarnizione (che sostituiva, in questa prima parte della sperimentazione quella a tenuta di gas, perché ritenuta più agevole dal punto di vista realizzativo e comunque interessante per quanto riguarda la tenuta).

Sulla base delle indicazioni riportate in Specifica Tecnica, è stato effettuato uno studio preliminare che ha portato alla definizione delle tre tipologie di accoppiamento. Per ciascuna tipologia individuata sono stati progettati i provini preliminari e quelli definitivi (stringa da quattro elementi).

Per quanto riguarda la tecnica di saldatura, partendo dalla propria esperienza in campo nucleare con la saldatura di tipo TIG, FN ha effettuato uno studio per valutare l'applicabilità della stessa a questo tipo di geometria e di vincoli. Si è concluso che per riuscire ad effettuare le saldature interne, e considerati i controlli di qualità e di certificazione da effettuare per garantire la bontà del giunto, si è deciso di optare per la microsaldatura laser, in grado di garantire una maggiore precisione in spazi così ristretti. I vantaggi di questa tipologia di tecnica risiedono soprattutto nel fatto di produrre saldature di alta qualità, con un minimo ritiro e minima distorsione (zona termicamente alterata praticamente quasi nulla), senza porosità. Per contro, poiché il cordone di saldatura è quasi inesistente, questa tecnica richiede di realizzare provini molto precisi nelle zone di accoppiamento. Successivamente si sono realizzati dei provini in assetto singolo per le prove preliminari e di pre-qualifica della saldatura, oltre ad un provino stringa da 4 fori. I campioni sono stati poi testati mediante prove in elio secondo il metodo Hood ottenendo valori molto interessanti. Saranno successivamente realizzati test di tenuta dopo ciclaggio termico. Sui provini singoli, già testati ad elio, verrà effettuata la caratterizzazione meccanica e strutturale.

Per quanto riguarda la seconda tecnica, "imbutitura", sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo. I provini ottenuti in queste prove sono stati sottoposti a test di tenuta in elio riscontrando valori non ancora soddisfacenti. I provini verranno sottoposti a prove distruttive per verificare l'accoppiamento ed ottenere ulteriori informazioni. Malgrado i primi risultati ottenuti, si ritiene sia necessario rivedere alcuni parametri ed effettuare modifiche ai provini prima di rigettare in toto questa tecnica.

Per quanto riguarda la terza tecnica, quella con filettatura e guarnizione, sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo (spessore guarnizione, modalità di serraggio). I provini sono stati sottoposti a prove di tenuta in elio, sia in vuoto sia in pressione, riscontrando interessanti valori. Il completamento della caratterizzazione con la stringa da quattro è in corso, inoltre sono state individuate anche delle modifiche alle guarnizioni che saranno sicuramente migliorative in termini di tenuta.

In conclusione, si può affermare che, confrontando i risultati preliminari ottenuti, risulta che la microsaldatura laser dà valori più bassi come segnale di perdita e sembra essere la strada migliore anche in termini di ripetibilità e controllo "passivo" della qualità della lavorazione.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/038 Progetto concettuale e di dettaglio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR
- RdS/2012/048 Rapporto Tecnico di fine fabbricazione e assemblaggio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR

B.4 Sviluppo tecniche di deposizione per processi di Detonation Spray

Una delle tecniche più interessanti per la deposizione di coating su materiali strutturali è sicuramente la tecnica del Detonation Spray (DS). La tecnica consiste nella progressiva deposizione a "freddo" di uno spessore variabile (da 5 µm a 5 mm) di un opportuno coating. Per le sue intrinseche caratteristiche, che permettono di non intaccare in alcun modo il substrato strutturale (sia termicamente che meccanicamente) la deposizione può avvenire su metalli, plastica, vetro, ceramica, pietra, legno, etc..

Questa tecnica permette inoltre di realizzare, accoppiata alla tecnica PVD, dei coating multilayer (Allumina former / Allumina) che rivestono particolare interesse in ambito LFR per proteggere i materiali strutturali dalla corrosione in piombo.

Nell'ambito del PAR 2011 si è provveduto all'approvvigionamento di una macchina per la DS, da installare in un apposito locale in fase di allestimento presso il CR Brasimone. I fornitori della macchina (STPC-Siberian Technologies of Protective Coatings Ltd., Russia), oltre alla installazione provvederanno anche alla formazione del personale addetto all'utilizzo.

A breve potrà essere possibile realizzare campioni ricoperti di diversa tipologia (FeAl, Fe_3Al, FeCrAl, etc..), che potranno quindi essere successivamente testati negli impianti e laboratori di prove materiali dell' ENEA.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/049 *Specifica tecnica di fornitura e set-documentale relativo all'approvvigionamento di una macchina di Detonation Spray per la realizzazione di coating su materiali strutturali*

C. Termoidraulica del Refrigerante

C.1 Implementazione laboratorio termoidraulica dei metalli liquidi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si sono ulteriormente implementate le attività di ricerca e sviluppo per la caratterizzazione preliminare di generatori di vapore (GV) prototipici per applicazioni in sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR).

In particolare, considerando la soluzione proposta di GV per l'impianto DEMO-LFR ALFRED, che prevede l'utilizzo di tubi a baionetta a doppia parete con interposta intercapedine conduttiva, si sono realizzate una serie di analisi parametriche sulle prestazioni del sistema.

Considerando un singolo tubo in scala 1:1, le analisi numeriche con codice di sistema (RELAP5) sono state incentrate sia sul tipo di riempitivo adottato che sui sistemi di isolamento fra l'acqua di alimento e il vapore surriscaldato in uscita al sistema.

Le simulazioni realizzate hanno quindi supportato la concettualizzazione e progettazione della sezione di prova per la caratterizzazione sperimentale delle prestazione di un singolo elemento a doppia parete in piena scala, e la concettualizzazione e progettazione della facility HERO (Heavy liquid mEtal – pRessurized water cOoled tube facility), impianto sperimentale che ospiterà il tubo a baionetta del GV di ALFRED per le fasi di sperimentazione in piombo.

Si sono quindi realizzati una serie di calcoli numerici mediante codice di fluidodinamica computazionale, per la simulazione analitica del singolo tubo, in supporto alla fase progettuale, costruttiva e sperimentale della facility HERO.

Relativamente alla strumentazione prototipica per metalli liquidi, in collaborazione con HZDR (Germania) si è individuato, progettato e realizzato un sistema di misura non intrusivo per la misura di portata in sistemi a piombo. Lo strumento, che sfrutta il principio della induzione elettromagnetica, è stato realizzato e installato sulla facility NACIE, dove si è realizzata una caratterizzazione preliminare dello strumento mediante test sperimentali di circolazione. I risultati ottenuti, seppur preliminari e incompleti, sembrano dimostrare il corretto funzionamento dello strumento.

Infine si è pianificata e avviata una attività di "code-coupling" tra codici di sistema e codici di fluidodinamica computazionale (CFD).

E' noto che per quanto riguarda l'utilizzo di codici numerici per il supporto alla progettazione e analisi di sicurezza dei sistemi LFR, i codici CFD riscuotono un continuo e sempre più esteso interesse da parte dei progettisti. I codici CFD permettono infatti di avere una più accurata e completa investigazione dei fenomeni analizzati, anche se a causa del loro elevato costo computazionale non possono sostituire i codici di sistema nell'analisi termoidraulica di insieme. I codici CFD sono quindi preferiti per l'analisi di fenomeni locali tridimensionali, mentre i codici di sistema sono preferiti per le analisi di sistema.

Spesso però l'analisi termoidraulica di sistemi complessi richiede diversi livelli di simulazione, dal dettaglio locale 3D alla simulazione di sistema 1D. Attualmente però l'approccio utilizzato prevede di avere simulazioni "stand-alone" sia con codici di sistema che con codici CFD, che inficia il risultato finale poiché viene annullata ogni retroazione tra i livelli di simulazione.

L'idea quindi è di implementare uno strumento di calcolo, che basato su codici di sistema e CFD già disponibili (e validati), ne realizzi un accoppiamento bi-direzionale step-by-step, permettendo quindi di affrontare simulazioni di sistemi termoidraulici complessi in maniera più efficace ed accurata.

Il lavoro svolto nell'ambito di questo sotto-obiettivo, ha previsto prima una review di letteratura per descrivere lo stato dell'arte circa l'accoppiamento di codici, e successivamente si è sviluppato un strumento di accoppiamento

esplicito fra codice di sistema e CFD applicato ad un problema semplice, dimostrando l'ottima qualità dei risultati ottenuti quando confrontati con simulazioni "stand-alone". Si sono inoltre definiti e pianificati i passi successici da implementare per arrivare ad sistema di calcolo che possa accoppiare codici di sistema e CFD in maniera affidabile ed efficace, anche su problemi complessi, evitando di dover intervenire sul sorgente di ogni codice. I più importanti riguardano:

- Sviluppo di uno schema di accoppiamento più robusto
- Estensione al calcolo parallelo
- Sviluppo di un interfaccia grafica che possa supportare l'utilizzatore
- Definizione di una campagna sistematica di validazione dello strumento di calcolo.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/050 Activities in Support to the Assessment of Steam Generator Bayonet Tubes, for GEN-IV Applications
- RdS/2012/051 Identificazione di un sistema di misura non intrusivo per i profili di velocità in piombo. Specifica tecnica di fornitura e documentazione relativa alla installazione e collaudo
- RdS/2012/052 Stato dell'arte sull'accoppiamento fra codici di sistema e di fluidodinamica computazionale. Applicazione generale su sistemi a metallo liquido pesante

C.2 Caratterizzazione pompe centrifughe ad asse verticale per sistemi a piscina

L'attività prevedeva la progettazione e realizzazione di un'apposita sezione di prova da installare nell'impianto CIRCE, nella quale alloggiare un prototipo di pompa centrifuga ad asse verticale con girante autocentrante al fine di caratterizzarne, mediante misure di portata e prevalenza, le relative prestazioni fluidodinamiche.

L'obiettivo non è stato conseguito per i seguenti motivi

1. L'impianto CIRCE è risultato impegnato per tutto il 2012 (fino a marzo 2013) per la pianificazione e realizzazione di test di "long-term station blackout" (tipo Fukushima) su sistemi nucleari refrigerati a metallo liquido pesante. Visto il crescente interesse della comunità internazionale su tale tematica, e il coinvolgimento dell'impianto CIRCE nel progetto THINS (Thermal Hydraulic of Innovative Nuclear System – FP7 EC), ENEA ha preferito estendere ed ampliare le attività di ricerca su questa attività.
2. Il crescente interesse in ambito europeo per la caratterizzazione in piombo di materiali strutturali già qualificati per applicazioni nucleari (15-15 Ti, AISI 316L, T91), al fine anche di accelerare le attività di R&S previste dalla roadmap dei sistemi LFR, ha spinto ENEA a dirottare risorse umane ed economiche dell'obiettivo C2 sull'obiettivo B.

C.3 Qualifica sistema DHR per impianti LFR

Nell'ambito delle attività di caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW installato sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (Integral Circulation Experiment), sono state realizzate diverse sessioni sperimentali.

Prove a piena potenza sono state realizzate con lo scopo di ottenere informazioni utili in termini di portata di refrigerante (metallo liquido), accoppiamento termico fra sorgente termica e pozzo di calore, prestazioni del sistema di controllo della chimica del refrigerante, prestazioni di componenti prototipici (DHR-800 kW).

Si sono poi realizzate simulazioni sperimentali di alcuni scenari incidentali relativi ai sistemi LFR (perdita di portata di circolazione, perdita dell'acqua di refrigerazione), ottenendo utili informazioni e dati per la comprensione e l'analisi del comportamento incidentale di tali sistemi.

I risultati ottenuti hanno dimostrato la fattibilità termoidraulica (in scala 1 MW) del sistema primario del reattore LFR. Si sono inoltre ottenute utili informazioni per la caratterizzazione termoidraulica dei sistemi a piscina refrigerati a metallo liquido pesante (stratificazione termica, miscelamento, fatica termica, etc..), anche se la sezione di prova nella sua configurazione inziale non permetteva di investigare dettagliatamente tali fenomeni. A tale proposito si sono definiti diversi interventi di up-grade sulla sezione di prova che sono stati successivamente implementati nell'ambito delle attività oggetto del sotto-obiettivo, e che hanno riguardato:

1. installazione di un sistema della rimozione della potenza di decadimento da 40 kW (DHR), che utilizza aria come fluido termovettore; questo sistema, accoppiato al DHR ad acqua da 800 kW (utilizzato come pozzo termico), permette di simulare sperimentalmente dei transitori di "long-term station blackout" (evento tipo Fukushima);
2. strumentazione del fuel pin bundle e della piscina di CIRCE al fine di ottenere dati relativi al coefficiente di scambio termico convettivo in fuel bundle (esperimento unico nel suo genere) sia in regime di

circolazione forzata che di circolazione naturale, e dati circa la stratificazione termica e di miscelamento in piscina.

Attualmente la sezione di prova, modificata e profondamente strumentata, è in fase di esercizio nella facility CIRCE per la simulazione di scenari incidentali relativi ai sistemi LFR e per l'acquisizione di dati utili per la investigazione dei fenomeni di scambio termico e per la qualifica dei codici di calcolo proposti come strumenti di progettazione e analisi di sicurezza. Entro marzo 2013 tali dati saranno resi disponibili e analizzati dalla comunità scientifica.

In supporto all'attività sperimentale, è stata realizzata un'accurata analisi numerica che ha supportato la re-definizione e il miglioramento della sezione di prova ICE. Scopo dell'attività è stato quello di investigare il sistema a piscina CIRCE in regime di circolazione naturale in scenario DHR, valutando la stratificazione termica in piscina.

L'analisi è stata realizzata sviluppando un accoppiamento fra codici di sistema (RELAP5) e codice CFD (Fluent) di tipo elementare (one-way). I risultati ottenuti mostrano l'instaurarsi di una stratificazione termica in piscina durante il regime di DHR (circolazione naturale e potenza 40 kW), con una portata di circolazione del refrigerante nel DHR ad aria che è simile alla portata in circolazione naturale che si instaura nel sistema primario (il DHR ad aria è inserito nel downcomer e idraulicamente disaccoppiato dal sistema primario). Tali risultati non solo hanno supportato l'implementazione della nuova sezione di prova ICE, ma hanno permesso di individuare le scale di tempo in gioco permettendo di definire una corretta procedura di prova.

Relativamente al DHR si è poi elaborata una nuova specifica tecnica di prova, necessaria per la completa caratterizzazione del DHR da 800 kW. Partendo dalle prove già realizzate, che hanno dimostrato il corretto dimensionamento funzionale del DHR, e confermato il raggiungimento della crisi termica al di sotto di una certa soglia di portata, si sono definite una nuova serie di prove con strumentazione aggiuntiva e con modifiche all'attuale configurazione ICE.

1. La prima serie di prove consiste nella ricerca della zona di stabilità termoidraulica del componente e di eventuali condizioni per cui le sollecitazioni termiche saranno limitate alla parte corrente del fascio senza produrre eccessivi carichi termici nel collegamento dei tubi intermedi alla corrispondente piastra tubiera. L'obiettivo della prova è di verificare la possibilità di ridurre la portata d'acqua fino ad un valore tale da ottenere vapor saturo secco o leggermente surriscaldato in uscita con sollecitazioni termiche accettabili per il componente. Una tale possibilità sarebbe estremamente utile dal punto di vista progettuale per controllare la potenza estratta dal reattore e ridurre il consumo di acqua nel medio-lungo termine quando la potenza da asportare è ridotta;
2. La seconda serie di prove è propedeutica alla ricerca di soluzioni meno sensibili ad instabilità procedendo ad aumentare la pressione di uscita vapore dallo scambiatore con l'introduzione di una valvola a saracinesca sulla tubazione di scarico.
3. Terza serie di prove. Disaccoppiare il DHR dal nocciolo introducendo un bypass con la piscina a livello del separatore.

I risultati hanno confermato la superiorità, in termini di sicurezza, dei reattori refrigerati a piombo.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/055 Specifica di prova per la caratterizzazione in regime transitorio del sistema DHR prototipico
- RdS/2012/056 Post test analysis of ICE tests
- RdS/2012/057 Numerical analysis of the thermal-hydraulic behavior of the ICE test section by the coupling of a system code and a CFD code
- RdS/2012/200 CIRCE Experimental set-up and test matrix definition

C.4 Prove e calcoli di scambio termico in regime di circolazione mista: up-grade impianto NACIE

Per quanto concerne la realizzazione di prove di scambio termico e perdite di carico in regime di circolazione mista (transizione dalla circolazione forzata alla circolazione naturale), si sono definiti una serie di interventi da attuare sull'impianto NACIE, tra cui l'installazione e strumentazione di un fuel pin bundle da 250 kW.

Nell'ambito delle attività implementate di questo sotto-obiettivo si è provveduto quindi a:

- progettare e avviare la realizzazione del fuel pin bundle da 250 kW da installare nell'impianto NACIE; il fuel pin bundle, finanziato nell'ambito del progetto SEARCH (FP7 EC) sarà disponibile entro marzo 2013;
- progettare, realizzare e installare un sistema di regolazione e controllo potenza sull'impianto NACIE, appositamente concepito per alimentare e controllare il fuel pin bundle da 250 kW;
- progettare, realizzare e installare uno scambiatore di calore da 250 kW, operante con acqua in pressione (16 bar), e che utilizza la tecnologia dei sistemi a doppia parete con interposto gap conduttivo (polvere di acciaio) al fine di accrescerne la sicurezza e affidabilità.

Con gli interventi sopra menzionati l'impianto NACIE sarà completato e operativo entro marzo 2013.

In preparazione degli esperimenti una serie di analisi numeriche di pre-test sono state realizzate, mediante il codice di sistema RELAP5. L'obiettivo è stato quello di analizzare la risposta del sistema durante le prove di circolazione naturale che simulano uno scenario di perdita di portata nel fuel pin bundle. Si sono realizzate una serie di analisi parametriche in funzione della potenza del fuel pin bundle, della portata di acqua nel circuito secondario, della temperatura dell'acqua di alimento, delle perdite di carico sul circuito primario.

Si sono inoltre implementati, in via preliminare e adottando una schematizzazione molto semplificata dell'impianto NACIE, una serie di calcoli di pre-test accoppiando il codice di sistema RELAP5 con il codice CFD FLUENT. I calcoli hanno dimostrato come l'accoppiamento RELAP5-CFD permette di simulare correttamente il comportamento della facility NACIE, sia in regime di circolazione naturale che circolazione assistita per iniezione di gas. L'accoppiamento richiede comunque un ulteriore implementazione e potenziamento, ottimizzando ad esempio lo schema di accoppiamento attraverso anche una validazione sperimentale.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/058 Pre-test analysis of thermal-hydraulic behavior of the NACIE facility for the characterization of a fuel pin bundle
- RdS/2012/059 Sistema di alimentazione e controllo potenza impianto NACIE
- RdS/2012/201 Scambiatore di Calore NACIE

C.5 Prove e calcoli di scambio termico in regime di circolazione forzata: implementazione impianto HELENA

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo tese al supporto dei sistemi LFR, e a completamento di quanto già realizzato nel precedente piano annuale mediante l'acquisizione di una pompa centrifuga con girante in acciaio austenitico rivestito in Tantalio, si è provveduto alla progettazione, realizzazione e installazione dell'impianto a piombo denominato HELENA.

L'impianto, che sarà ampiamente utilizzato per la caratterizzazione dei materiali strutturali per metalli liquidi pesanti in ambiente a basso tenore di ossigeno (vedi anche obiettivo B), si inserisce nella attività di ricerca e sviluppo che ENEA realizza in ambito Europeo. Tra i vari filoni di ricerca pianificati con il supporto dell'impianto HELENA, è prevista la realizzazione di prove di scambio termico e perdite di carico in fuel pin bundle refrigerati a piombo in regime di circolazione forzata. Tale attività si integra e completa le azioni sviluppate e pianificate nell'obiettivo C4.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/060 Fornitura, installazione e collaudo dell'impianto a metallo liquido pesante HELENA
- RdS/2012/061 Verbale montaggio e riempimento polveri HX impianto HELENA

D. Analisi di Sicurezza

D.1 Controllo della chimica nei sistemi a metallo liquido pesante e qualifica sonde a ossigeno

La compatibilità chimica dei materiali strutturali e quindi il loro corretto impiego nei sistemi nucleari di quarta generazione refrigerati a piombo, è fortemente correlato con il tenore di ossigeno disciolto nel metallo liquido a cui viene esercito il sistema. E' di fondamentale importanza quindi disporre di un sistema di regolazione e controllo del tenore di ossigeno disciolto nel metallo liquido che permetta di purificare il sistema nelle fasi di avvio e manutenzione, quando l'inquinamento da ossigeno è massimo, e di regolare il tenore di ossigeno entro i limiti desiderati durante il normale esercizio e i transitori operazionali. Elemento portante del sistema di regolazione e controllo dell'ossigeno disciolto nel refrigerante nucleare sono le sonde ad ossigeno, che permettono di realizzare il monitoraggio nel metallo liquido.

Nell'ambito di questo sotto-obiettivo ENEA, in collaborazione con la FER Strumenti ha provveduto a progettare, prototipare e realizzare sonde a ossigeno per metalli liquidi basate sulla tecnologia delle celle elettrolitiche ad ossido di zirconio/yttria. Si è inoltre provveduto a:

- mettere a punto il processo di fabbricazione secondo i parametri di progetto definti da ENEA;
- realizzare alcuni prototipi di diversa lunghezza, per applicazioni sia in sistemi a loop che in sistemi a piscina;
- calibrare le sonde prototipiche in impianti ad hoc del CR Brasimone.

Si è inoltre concettualizzato il sistema di regolazione e controllo dell'ossigeno disciolto in sistemi a piscina sfruttando le competenze ed esperienza ENEA in questo settore, unico istituto di ricerca in Europa che dispone di una facility a piscina (CIRCE) di grandi dimensioni (90 t di metallo liquido)

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/062 Concettualizzazione del sistema di regolazione e controllo dell'ossigeno disciolto in sistemi nucleari a piscina refrigerati a Piombo
- RdS/2012/063 Sviluppo e qualifica di sonde per il monitoraggio dell'ossigeno disciolto in sistemi nucleari a piscina refrigerati a piombo

D.2 Fuel - Cladding - Coolant Interaction

Nell'ambito dello sviluppo dei reattori LFR, ai fini della valutazione degli incidenti severi che portano al danneggiamento del combustibile, assumono particolare rilevanza le indagini sperimentali relative all'interazione tra il combustibile (UO2 e/o MOX fuel) ed il refrigerante (piombo fuso).

Numerosi studi di letteratura hanno affrontato i problemi della compatibilità tra il piombo fuso e gli acciai impiegati per il cladding e delle conseguenti interazioni chimico-fisiche tra il fuel e il cladding (fuel-cladding chemical interaction, FCCI) sia in condizioni di normale funzionamento che in condizioni incidentali. Scarse informazioni sono invece disponibili in caso di contatto tra il fuel e il coolant in seguito ad un evento di fessurazione della guaina: la conoscenza di ciò che potrebbe accadere in questa eventualità risulta quindi fondamentale al fine di prevedere l'evoluzione dell'evento e le conseguenze a cui potrebbe portare. L'attività di ricerca si è posta come obiettivo l'individuazione dei composti chimici che in prima battuta si possono formare da un punto di vista termodinamico in un sistema di cui sia nota la composizione chimica iniziale insieme alle condizioni operative di funzionamento. Analogamente è stata considerata anche la condizione incidentale Unprotected Loss-of-Flow (ULOF). Sono stati individuati diversi sistemi-studio costituiti da uno specifico combustibile (uranio metallico, ossido di uranio e MOX) e dal piombo fuso, per i quali sono stati ricercati in letteratura i dati termochimici necessari. E' stato individuato e definito un volume di riferimento sulla base del quale sono stati stabiliti i dati in input. Quindi mediante l'utilizzo di un opportuno codice di calcolo opportunamente adattato, che minimizza l'energia libera di Gibbs del sistema, è stato possibile ottenere informazioni sull'equilibrio all'asintoto del sistema-studio, a prescindere dai fenomeni chimico-fisici e dalla loro cinetica. In particolare, è stato verificato che nel sistema U-Pb a temperature variabili tra i 700 e i 1450 K (range che comprende le condizioni nominali e ULOF), si ha la completa interazione tra i componenti a dare i due composti intermetallici PbU e Pb_3U. Al contrario, nel sistema UO_2-Pb nello stesso range di temperature, è stato invece verificato che la frazione finale di ciascun componente varia di poco rispetto al valore iniziale, suggerendo una minore reattività del sistema. A causa della scarsa disponibilità di dati termochimici sui composti intermetallici del plutonio, sono ancora in corso le ricerche volte a raccogliere i parametri necessari alle simulazioni e non sono ancora al momento disponibili risultati relativi ai sistemi-studio che lo contengono. Successivamente, saranno oggetto di approfondimento i sistemi-studio che tengono in considerazione i materiali della guaina e i prodotti di fissione formatisi in seguito al bruciamento. In aggiunta, è stato proposto e avviato un interessante approccio teorico basato su metodi ab-initio che al momento è solo delineato e che necessita di un ulteriore sviluppo mirato a questo tipo di applicazione in ambito nucleare al fine di poter disporre di un'altra via per lo studio della problematica ed al contempo verificare la congruenza di risultati ottenuti seguendo approcci teorici diversi.

Inoltre, per quanto riguarda l'interazione cladding-coolant ad elevate temperature (es. ULOF), ENEA si è attrezzata per svolgere attività sperimentali propedeutiche a temperature variabili tra 600 e 1000°C, pianificando test su acciai ritenuti idonei come materiali di rivestimento (vedi obiettivo B) al fine di evidenziare fenomeni di corrosione e danneggiamento a carico dei medesimi in presenza di piombo stagnante. Queste ultime prove saranno effettuate presso il CR Brasimone entro dicembre 2013.

In parallelo allo studio teorico-analitico dell'interazione chimico-fisica fuel-coolant, ENEA ha svolto proprie valutazioni supportate da attività sperimentali (C.R. Casaccia) con simulanti dell'ossido di uranio. E' noto infatti che nel corso di transitori incidentali il combustibile nucleare può essere sottoposto ad un'ampia varietà di condizioni. Queste ultime sono di natura dinamica e il combustibile potrebbe essere esposto a temperature variabili tra 600 e 2400 °C, come pure ad ambienti che vanno da altamente ossidanti a debolmente riducenti. L'esposizione del combustibile nucleare a questi ambienti e temperature diverse influenza le modalità di rilascio dei prodotti di fissione. E' stato quindi analizzato quanto accade a seguito del contatto diretto di alcune sostanze - derivanti dalla fissione del combustibile UO_2 - con il refrigerante (piombo fuso) in un reattore a piombo. Le prove sperimentali evidenziano come, per le sostanze chimiche prese in esame (ossido di cerio, cloruro di cesio, antimonio metallico), non ci sia interazione di tipo chimico, e le stesse si limitino a "galleggiare" sul refrigerante liquido. Sono state inoltre formulate delle ipotesi su ciò che accadrebbe se si prendesse in esame l'ossido di uranio.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/064 Studio preliminare dell'interazione Fuel-Coolant in Reattori LFR: applicazione di un codice di calcolo

- RdS/2012/065 Studio delle interazioni ad elevata temperatura tra la guaina di combustibile e refrigerante in un sistema LFR
- RdS/2012/066 Analisi di fattibilità per prove di interazione chimica tra refrigerante e combustibile nei laboratori della Casaccia

D.3 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione nei sistemi LFR

Nell'ambito delle attività di ricerca implementate in supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR) si rende necessario caratterizzare e quantificare il trasporto dei prodotti di fissione nel sistema primario e nel gas di copertura, valutando le attitudini del refrigerante (piombo) a ritenere i prodotti di fissione (specialmente quelli volatili) sia in condizioni di normale funzionamento che di transitorio operazionale ed incidentale.

L'attività si è posta come obiettivo di valutare (delineando una apposita metodologia) il tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato di un sistema LFR. Quando gli elementi di combustibile vengono irraggiati vengono generati prodotti di fissione, alcuni dei quali gassosi (principalmente i gas nobili xeno e cripton), e altri molto volatili e accompagnano quelli gassosi sotto forma di vapori, aerosol e particolati. In generale viene usato il termine "gas di fissione".

Per la maggior parte tali prodotti rimangono all'interno del combustibile, ma una parte di essi viene rilasciata per diffusione nelle cavità interne delle barre di combustibile, appositamente progettate allo scopo di trattenerli. Il rilascio di gas di fissione dal combustibile è fortemente legato alla temperatura del combustibile, alla generazione di calore, burn-up, tempo e storia di irraggiamento, processo di fabbricazione, ecc.. Gli studi, già svolti con continuità per molti anni, sono tuttora in corso, in relazione allo sviluppo di nuovi reattori, tipi di combustibile, guaine ed elementi strutturali. Le attività di ricerca sono basate sull'utilizzo di diverse tecniche di monitoraggio, quali misura continua della pressione nelle barre di combustibile e spettrometria dei gas di fissione. Gli esperimenti sono di tipo "in-pile" ed "out-of-pile", cioè il combustibile viene irraggiato dentro un reattore nucleare oppure fuori reattore, cioè in condizioni simulate. I gas di fissione vengono prelevati dall'interno delle barre con diverse tecniche, analizzati e caratterizzati quanto a composizione elementare ed isotopica (differenti valori di vita media). I risultati sono poi confrontati e correlati a tipo di combustibile, processo di fabbricazione, condizioni operative cui l'elemento di combustibile è stato sottoposto, ecc.. Parallelamente, anche sulla base dei nuovi dati sperimentali ottenuti, vengono sviluppati modelli matematici in grado di descrivere con accuratezza i diversi processi di rilascio dei gas di fissione e calcolare diversi parametri operativi, quali ad esempio i valori di pressione entro le barre di combustibile durante l'irraggiamento.

La metodologia proposta per la valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione prevede l'utilizzo di un metodo di analisi completamente statistico basato sull'utilizzo di codici Monte Carlo, accoppiato con codici di fuel-pin-performance basati su modelli semi-empirici (approccio deterministico).

La metodologia proposta, solo delineata, necessità di dati accurati circa il combustibile di un reattore LFR, come Linear-Heat-Rate (LHR), Spettro Neutronico, temperatura di camicia, pressione interna alla guaina, caratteristiche del combustibile (densità reale, porosità, granulometria, etc..), dati attualmente non disponibili.

Il prossimo passo consiste quindi nella completa implementazione della metodologia proposta e alla sua validazione sfruttando i dati sperimentali relativi per esempio al combustibile nucleare utilizzato per SFR. Tali dati, di proprietà di enti di ricerca quali il CEA, dovrebbero essere acquisiti implementando comuni progetti di R&S sui reattori veloci.

Relativamente al progetto concettuale e studio di fattibilità di una apparecchiatura sperimentale in cui simulare, in base al tasso di rilascio stimato, la migrazione dei singoli prodotti di fissione nel refrigerante primario, il trasporto in fase gassosa, la filtrazione e purificazione in fase gassosa, si è definito un progetto quasi ingegneristico dell'apparecchiatura che potenzialmente è in grado di evidenziare i fenomeni di rilascio lato combustibile e lato guaina. La strumentazione di riferimento è in questa fase di tipo generale e concettuale. L'apparecchiatura consta di una sezione di prova costituita da due camere (interna ed esterna) e da due circuiti caratteristici detti lato gas e lato piombo. Permette di operare dalla pressione ambiente sino a pressioni di 80 bar lato gas, e temperature sino a 700 °C. Il progetto di riferimento è idoneo a studiare il rilascio di prodotti gassosi intrappolati in matrici sinterizzate che simulano le pastiglie di combustibile irraggiato. La camera di misura consente di caratterizzare il comportamento delle guaine per quanto riguarda i fenomeni di diffusione e permeazione attraverso la guaina. La camera esterna, oltre a poter fornire informazioni sui fenomeni di corrosione all'interfaccia piombo liquido-guaina, poiché trasporta i rilasci gassosi, è potenzialmente in grado di fornire dati sui fenomeni di trasporto e migrazione di specie chimiche gassose rilasciate attraverso un'interfaccia liquido/gas, misurando l'evoluzione della composizione dell'atmosfera gassosa. L'apparecchiatura è progettata con lo scopo di metterla a punto e tararla in assenza di rischi di natura radiologica, e di renderla compatibile con un potenziale impiego in cella calda in prove

di post irraggiamento. Si riporta inoltre anche il progetto di un impianto pilota (OGATA) per lo studio della cattura di specie gassose volatili.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/067 Valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato di un sistema LFR
- RdS/2012/232 Methodology for the evaluation of fission gas release in Lead Fast Reactor
- RdS/2012/068 Progetto concettuale e studio di fattibilità di una apparecchiatura sperimentale per la caratterizzazione del rilascio e migrazione dei prodotti di fissione in un sistema LFR. Specifica di prova

D.4 Analisi scenari incidentali su sistemi LFR

Nell'ambito dell'attività si sono analizzati numericamente possibili scenari incidentali sui sistemi LFR, con l'obiettivo di identificare e supportare future attività di ricerca e sviluppo, sperimentazione, qualifica componenti, che nel medio-lungo termine possano poi supportare il relativo processo di licensing di tali sistemi.

A tale scopo si sono individuati preliminarmente i seguenti scenari incidentali.

- Perdita di integrità del nocciolo (core degradation)

L'attività ha avuto come obiettivo la verifica di sicurezza di un sistema nucleare veloce refrigerato a piombo a seguito di un evento incidentale che comporti la parziale o completa distruzione del nocciolo. A riferimento si è considerato il reattore veloce refrigerato a metallo liquido pesante MYRRHA FASTEF (Belgio, SCK-CEN), di cui sono disponibili dati geometrici e condizioni operative.

Mediante il codice SIMMER-III, sviluppato per "safety analysis" dei sistemi veloci SFR, si è modellato il reattore MYRRHA FASTEF, mediante una nodalizzazione 2D di tipo cilindrica.

Dopo aver simulato una condizione di normale funzionamento (steady state condition), necessaria per ottenere i corretti profili di temperatura nel combustibile, nella guaina e nel refrigerante, e le relative portate e velocità del metallo liquido attraverso le varie sezioni e componenti del sistema, si è realizzata una simulazione relativa ad un transitorio incidentale di perdita di portata (ULOF). I risultati ottenuti sono poi stati comparati con i calcoli realizzati con il codice di sistema RELAP5.

Si è inoltre simulato un transitorio di "fuel dispersion", parametrizzando relativamente alla porosità del combustibile.

I risultati prodotti hanno messo in evidenza l'importanza di una corretta e accurata valutazione delle forze di galleggiamento e di trascinamento che agiscono sul combustibile una volta disperso nel refrigerante, sottolineando come la porosità del combustibile (che è funzione della storia del combustibile e del relativo burn-up) e la velocità del refrigerante nelle varie sezioni del sistema primario giocano un ruolo predominante nella dispersione e intrappolamento del combustibile nei vari componenti del reattore. Ad elevate porosità il combustibile, seppur leggermente più denso del refrigerante, tende ad accumularsi sul pelo libero del reattore, mentre per basse porosità e velocità del fluido tende a depositarsi sulle superfici sommerse del circuito primario. Per una più accurata valutazione occorre comunque provvedere ad una simulazione 3D (SIMMER-IV) del sistema, parametrizzando ancora sulla porosità del combustibile irraggiato.

- *Perdita di refrigerazione (flow blockage*)

Nell'ambito dell'attività si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale, che ha come obiettivo l'analisi della mutua interazione fra diversi elementi di combustibile a seguito della parziale o completa perdita di portata di refrigerazione attraverso uno di essi. Come geometria di riferimento si è considerato sia un nocciolo realizzato con elementi di combustibile a reticolo quadrato senza scatola (ELSY), sia un nocciolo con elementi di combustibile a reticolo esagonale inscatolati (ALFRED).

A seguito delle simulazioni numeriche realizzate tramite il codice CFX, si è evidenziato come l'effetto del flow blockage sugli elementi di combustibile consiste di due effetti, uno locale e l'altro globale. L'effetto locale, governato dai moti di ricircolo secondario che hanno luogo a valle dell'ostruzione, si manifesta con un picco di temperatura locale sulla guaina del combustibile, mentre l'effetto globale, governato dalla riduzione di portata massica nell'elemento di combustibile, si manifesta con un incremento della temperatura del refrigerante e quindi della guaina all'uscita della zona attiva del combustibile.

Gli elementi di combustibile aperto mostrano una minore sensibilità al fenomeno, poiché grazie ai moti trasversali fra i FA adiacenti, la portata del refrigerante lontano dall'occlusione è praticamente invariata. Nei FA chiusi l'occlusione genera invece una perdita di carico aggiuntiva che si ripercuote sul sistema con una riduzione non

trascurabile della portata di refrigerazione, il cui effetto è sentito anche in sezioni distanti dalla sezione interessata dall'occlusione.

Nella zona di ristagno immediatamente a valle dell'occlusione, il trasferimento di energia è governato non solo dalla diffusività turbolenta ma anche da quella molecolare, contrariamente quanto riportato in alcuni studi realizzati sui sistemi a sodio.

Per sistemi a reticolo aperto (ELSY), una occlusione del 40% della sezione di ingresso induce una massima temperatura di guaina di 1000 °C nella zona di ristagno, con un tempo caratteristico di circa 5 sec (senza feedback sulla potenza).

Nel caso di reticolo chiuso la temperatura massima di guaina nella zona di ristagno sale fino a 1500 °C, mentre il comportamento dei due sistemi non è dissimile se la occlusione è tenuta inferiore al 20%.

Parziale congelamento del sistema primario

Nell'ambito dell'attività si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici di fluidodinamica computazionale che permetta di investigare il comportamento termoidraulico del sistema primario (GV – pompa primaria, nocciolo) di un reattore LFR a seguito di un repentino ed esteso congelamento del metallo liquido fluente attraverso il GV.

Il metodo sviluppato implementa una metodologia che si base ancora su un sistema monofase (senza cambiamento di fase) attraverso l'inserimento nel dominio di calcolo di una sorgente di quantità di moto dipendente dalla velocità e temperatura del fluido nel volume di calcolo considerato. La consistenza fisica di tale approccio è garantita dal fatto che il calore latente di fusione è correttamente trattato nella formulazione. Nelle regioni congelate le velocità sono nulle grazie al termine sorgente e lo scambio di energia avviene puramente per conduzione. Laddove la frazione di solido è inferiore a 1, i termini convettivi sono abbattuti secondo funzioni peso imposte nel termine sorgente della quantità di moto.

Il metodo è stato preliminarmente validato su un problema molto semplice che assume una configurazione a piscina cilindrica con l'inserimento di una sorgente di calore e di un pozzo di calore a simulare il nocciolo e lo scambiatore di calore rispettivamente. Su tale problema semplificato il metodo si è dimostrato robusto e consistente, consentendo all'analista di pianificare i passi successivi per una ottimizzazione e miglioramento (termini sorgente validati su dati sperimentali) della metodologia prima di un utilizzo su sistemi reali.

- *Valutazione delle interazioni fluido-struttura nei sistemi LFR*

Scopo dello studio è stata la valutazione preliminare degli effetti strutturali (in termini di risposta globale del sistema) indotti da un terremoto di riferimento sui componenti "safety relevant" di un sistema nucleare LFR.

La valutazione, realizzata con codice di dinamica strutturale, ha preso in considerazione i sistemi nucleari LFR oggetto dei progetti europei (ELSY/ALFRED), introducendo opportune ipotesi per la simulazione dinamica del refrigerante, del vessel e del contenimento.

L'analisi sismica, basata sul metodo della "Time History", ha studiato separatemene gli effetti sul contenimento, sul vessel del reattore, e sulle strutture interne del sistema che sono particolarmente sensibili agli eventi sismici a causa dell'elevata massa del refrigerante. In particolare si è realizzato un accoppiamento fluido-struttura che ha permesso di valutare in via preliminare gli stress indotti dal fluido, e la relativa distribuzione, sui vari componenti del sistema primario, compreso il vessel.

Dai risultati ottenuti si evidenzia come la sollecitazione massima dovuta allo sloshing del piombo ha luogo nella parte inferiore dell'inner vessel, e gli spostamenti indotti su alcuni componenti interni al vessel non sono affatto trascurabili, e bisognerà quindi tenerne conto nella progettazione dei vari sistemi.

Infine, l'attività svolta evidenzia come, nelle analisi future occorrerà valutare in maniera approfondita l'influenza degli isolatori sismici adottati, considerando anche le frequenze di accoppiamento tipiche del refrigerante.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/069 Loss of core integrity in a LFR system: models and preliminary numerical analysis
- RdS/2012/070 Fuel Assembly flow blockage in a LFR reactor core: CFD modelling and preliminary numerical analysis
- RdS/2012/071 Freezing of the LFR primary pool: CFD modelling and preliminary analysis on prototypical configurations
- RdS/2012/072 Preliminary evaluation of the Fluid-Structure Interaction effects in a LFR

D.5 Processi di pirometallurgia in sali fusi per trattamento combustibile LFR esausto

Nell'ambito del ritrattamento dei combustibili viene dato un certo rilievo, a livello internazionale, al riprocessamento del combustibile ad ossidi misti uranio-plutonio-attinidi minori (cosiddetto MOX fuel), per il quale è stato sperimentato un processo di elettroraffinazione in ambiente di sali fusi (cloruro di litio contenente ossido di litio), alla temperatura di 650 °C.

La pirometallurgia nel campo nucleare è stata sviluppata allo scopo di mettere a punto un processo economicamente conveniente, in grado di contribuire alla non proliferazione di armamenti nucleari, e dotato di un'elevata operatività, associata ad una bassa produzione di rifiuti. Il recupero di radionuclidi a lunga vita viene incontro, per quanto possibile, all'esigenza di evitare lo smaltimento dei rifiuti ad alta attività in strati geologici profondi. La possibilità di applicare la pirometallurgia al riprocessamento di diverse tipologie di combustibile nucleare (metallico, ad ossidi misti, a nitruri, ad alto "burn-up", ecc.), consente il recupero dei radionuclidi a lunga vita ed il loro riciclo in diversi tipi di reattori ai fini della trasmutazione. Inoltre, per i combustibili previsti per i reattori di IV generazione (UO_2, MOX, a carburi, a nitruri, ecc.), rappresenta l'unica effettiva possibilità di trattamento, non essendo applicabili in questi casi i più comuni e collaudati metodi di idrometallurgia.

Al fine di verificare la fattibilità del processo pirometallurgico è stato realizzato presso il CR Casaccia, l'impianto pilota Pyrel III, operante "a freddo" sia con combustibile metallico (simulato), sia con ossidi metallici.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono documentate e dettagliate nel rapporto:

- RdS/2012/073 Valutazione della fattibilità di un processo a sali fusi per il recupero degli attinidi dal combustibile MOX

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

I principali soggetti esterni coinvolti nel tema di ricerca "Nuovo Nucleare da Fissione" sono CIRTEN, FN SpA, Università di Roma "Tor Vergata", Università dell' Aquila, Università di Pavia e Università Politecnica delle Marche. Per ciascuno di questi soggetti viene fornito di seguito 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 attività svolte presso le seguenti Università consorziate: Politecnici di Milano e Torino, Università di Palermo, Pisa, Roma I (La Sapienza), Padova e Bologna. Tali attività vengono riportate in sintesi in quanto segue, con riferimento alle 3 Linee Progettuali ed ai singoli obiettivi del PAR-2011.

LINEA PROGETTUALE 1: COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI

A. Supporto al Ministero dello Sviluppo Economico - DGENRE per studi di scenario e partecipazione a gruppi e comitati nazionali e internazionali

A.2 Studi di scenario [Report RdS/2012/156 e RdS/2012/155]

Nell'ambito degli studi di scenario, il CIRTEN ha collaborato alle seguenti attività

- analisi relativa all'impatto dell'energia nucleare su sostenibilità ed economicità per varie opzioni di mix energetici, mediante studio delle variabili macroscopiche energetico-ambientali, considerando tra l'altro gli aspetti economici-finanziari relativi all'impiego di SMR in diversi scenari di mix di energie rinnovabili;
- analisi relativa all'impatto dell'energia nucleare su sostenibilità ed economicità per varie opzioni di mix energetici, con relativi scenari economici compatibili con gli obbiettivi di de-carbonizzazione della "Energy Roadmap 2050" della Commissione Europea, ed i relativi costi.

B. Studi nell'ambito di accordi bilaterali

B.1 Analisi incidentali deterministiche e utilizzo di simulatori di impianto a supporto delle verifiche di sicurezza [Report RdS/2012/157 e RdS/2012/158]

Sono stati svolti studi dedicati alla valutazione di sicurezza di impianti nucleari attuali in situazioni di "Long-Term Station Black-Out Tipo" (evento tipo Fukushima). I lavori, condotti in sinergia con l'Università di Pisa e l'Università di Palermo, impiegano due diversi codici di simulazione per studiare gli effetti di tale tipologia incidentale sull'impianto considerato.

B.2 Accordo con CEA: Prosecuzione della collaborazione nel campo della progettazione impiantistica nucleare [Report RdS/2012/159]

Nell'ambito della collaborazione ENEA-CEA sulla progettazione del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR), il CIRTEN, in partnership con ENEA, ha collaborato alla progettazione di canali sperimentali del sistema. In particolare, il lavoro ha riguardato uno studio sull'apporto di potenza generata da sezioni di prova contenenti elementi "attivi" nel caso di spegnimento del reattore in condizioni normali e in condizioni di sicurezza (safety shutdown).

B.3 Collaborazioni Internazionali per studi su SMR [Report RdS/2012/162]

In questa attività è stato esplorato lo stato dell'arte sulla tecnologia degli Small Modular Reactor (SMRs, a valle di una serie di incontri scientifici internazionali sul tema organizzati dal Politecnico di Milano nel periodo 2011-2012. Lo studio realizzato si propone di affrontare tali aspetti della tecnologia SMR offrendo una rassegna aggiornata delle principali offerte presenti sul mercato e sui progetti di ricerca attualmente in corso, analizzandone le possibili chiavi di successo sul mercato globale per il prossimo futuro.

C Partecipazione ad attività, gruppi e comitati internazionali

C.2 Prosecuzione della partecipazione a comitati e gruppi internazionali (AIEA , OECD-NEA, GIF, IFNEC ecc.) [Report RdS/2012/164 e RdS/2012/165]

L'attività, svolta in sinergia con il CIRTEN, ha riguardato la partecipazione di alcuni gruppi di ricerca ad alcune conferenze internazionali, quali SPRING 2012 CAMP MEETING e alla conferenza ICONE20-POWER2012.

Nell'ambito di tale obiettivo si è inoltre illustrato lo schema di procedura del NESA, sotto i vari aspetti. Tutti gli aspetti fondamentali connessi all'utilizzo dell'energia nucleare, ambiente, sicurezza, protezione fisica, non proliferazione, gestione rifiuti, economia e infrastrutture, vengono analizzati nel NESA con riferimento al ciclo nucleare complessivo a fronte di principi base, requisiti dell'utilizzatore e criteri della metodologia INPRO della IAEA.

C.3 Partecipazione allo OECD - Halden Reactor Project [Report RdS/2012/166]

L'obiettivo di tale attività è la implementazione della collaborazione ENEA nel contesto della sua partecipazione al Progetto internazionale dell'OECD/NEA Halden Reactor Project (HRP).

Con la collaborazione del CIRTEN, si è prodotta una panoramica degli esperimenti previsti nei prossimi anni, nel reattore di Halden, di cui molti relativi al fuel safety. La raccolta di dati sperimentali sul comportamento del combustibile potrà sicuramente migliorare la comprensione della meccanica del combustile in funzione dell'andamento effettivo del suo bruciamento (burn-up), fornendo utili dati relativamente ai fenomeni di rilascio gas di fissione, rilasci all'ambiente, generazione d'idrogeno, ecc..

D. Non Proliferazione e Safety & Security

D.2 Dati nucleari per la chiusura ciclo del combustibile (NEA, CERN [Report RdS/2012/168]

Relativamente alla chiusura del ciclo del combustibile, ENEA e CIRTEN hanno collaborato sulla riprogettazione dell'esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di ^{241}Am nel reattore TAPIRO.

Tra i metodi più efficaci per ridurre la radiotossicità dei rifiuti radioattivi, vi è il bruciamento degli elementi transuranici per fissione o cattura neutronica. Particolare importanza riveste l'isotopo dell' Americio 241, che è considerato tra i nuclidi più importanti per quanto riguarda la tossicità sia a breve che a lungo termine ed è presente in notevole quantità nei rifiuti nucleari. Il processo di trasformazione per cattura di neutroni o fissione può essere simulato numericamente ma alcuni parametri fondamentali quali le sezioni d'urto medie o i valori della probabilità di transizione ai diversi stati finali possibili, in molti casi non sono conosciute con l'adeguata precisione. Rivestono quindi notevole importanza gli esperimenti tendenti a validare ed eventualmente correggere i parametri nucleari di interesse che possano essere convenientemente condotti in reattori di ricerca, quali il TAPIRO.

LINEA PROGETTUALE 2: STUDI DI SICUREZZA SUGLI IMPIANTI NUCLEARI

A. Sviluppo e validazione di metodi e strumenti per le analisi di sicurezza

A.2 Metodi e codici per analisi di neutronica [Report RdS/2012/06]

La Task LP2-A.2 ha visto il contributo di CIRTEN-Università di Bologna nella preparazione di librerie multiparametro (temperature del fuel, densità del moderatore, concentrazione di boro nel moderatore, burn-up) Saphyb di sezioni d'urto equivalenti per assembly omogeneizzati, a 2 gruppi energetici, per la configurazione di start-up di un nocciolo di PWR da 900 MWe francese di classe CP1. La preparazione è avvenuta mediante ricorso al codice di trasporto deterministico Apollo2. In particolare CIRTEN ha contribuito alla modellizzazione in modalità Multicell, per l'utilizzo del Metodo delle Probabilità di Collisione Pij per la risoluzione dell'equazione del trasporto neutronico, della geometria dell'assembly 17x17, con e senza barre di controllo, e con e senza barre di veleno bruciabile in vetro borosilicato. Ha poi provveduto alla selezione ed all'impostazione dei parametri di autoschermo delle sezioni d'urto in funzione del burn-up (sino ad un massimo di 60 GWd/MTU) ed al reperimento delle proprietà fisiche del moderatore al variare di temperatura e pressione. Infine ha contribuito ad individuare gli stati di funzionamento del reattore utili alla definizione dei range dei parametri fisici delle librerie Saphyb.

A.3 Piattaforme di calcolo avanzate per la termo-idraulica [Report RdS/2012/07]

Lo scopo dell'attività in cui CIRTEN (Università di Bologna) è coinvolto, è consistito nell'ottimizzazione dell'implementazione della piattaforma NURESIM-NURISP sul sistema CRESCO (Centro Computazionale di Ricerca sui Sistemi Complessi) dell'ENEA e nella validazione di alcuni delle applicazioni in essa contenute.

Il progetto NURISP è stato ideato per integrare e sviluppare vari codici usati per simulare il comportamento termo-idraulico di impianti nucleari o componenti all'interno di un'applicazione più estesa basata sulla piattaforma open-source SALOME. Il fine ultimo è quello di poter accoppiare i singoli codici al fine di risolvere problemi di multifisica e che necessitano che diversi livelli di risoluzione siano adottati contemporaneamente. Nell'ambito del presente PAR 2011 ENEA e CIRTEN hanno proseguito l'attività di implementazione della piattaforma NURISP sul sistema di calcolo ad alte prestazioni dell'ENEA CRESCO, già iniziata nella precedente annualità. É stata inoltre portata avanti l'attività di validazione di alcuni codici della piattaforma e testata l'attuale possibilità di accoppiare gli stessi.

I codici considerati per le attività di validazione sono stati CATHARE, NEPTUNE and TRIO_U. Il primo è un codice di sistema mentre gli altri due sono codici CFD (Computational Fluid Dynamics). Al momento questi codici funzionano in modo disaccoppiato, con formati di input ed output non completamente compatibili. I codici hanno obiettivi e licenze differenti. CATHARE è un codice per l'analisi termo-idraulica incidentale di reattori ed analisi di sicurezza in LWR, la gestione incidentale e la definizione delle procedure operative per gli impianti. All'interno di questo obiettivo si è proseguito con l'attività di validazione del codice. In particolare è stato ulteriormente sviluppato il modello numerico per la simulazione dell'impianto SPES-99. I risultati del modello sono poi stati confrontati con i dati sperimentali e con i risultati ottenuti utilizzando altri codici. Tale confronto ha evidenziato la buona capacità del codice nel riprodurre il comportamento dell'impianto anche in condizioni di transitorio e suggerito possibili miglioramenti del modello numerico.

TRIO_U e NEPTUNE risolvono le equazioni della fluidodinamica e sono in particolare applicati a flussi bifase. Nel corso della presente annualità, si è proseguito nel tentativo di ottenere una simulazione accoppiata CATHARE-NEPTUNE dell'esperimento PERSEO, in particolare il Test n.9. Nella precedente annualità tale operazione era stata realizzata operando una simulazione CATHARE del transitorio e ricavandone le condizioni al contorno per la simulazione CFD su un dominio 2D rappresentante l'insieme di piscina di soppressione del vapore ed iniettore. I risultati di tale simulazione, sebbene cogliessero il tasso di aumento della temperatura nel transitorio dato, non mostravano la stratificazione della temperatura sotto l'uscita dell'iniettore, presente invece nei dati sperimentali. Nella presente annualità si è proseguita tale analisi con simulazioni 3D dello stesso sottosistema. Una soluzione per una prima parte del transitorio è stata ottenuta su una geometria semplificata nella quale l'iniettore entra nella piscina dal centro del soffitto anziché di lato. Tale soluzione sembra evidenziare come la stratificazione osservata sperimentalmente sulle sole sonde poste sotto all'iniettore, ma a 0,5 m dalla parete della piscina, sia dovuta più ad un effetto di parete che ad un'azione diretta dell'iniettore. Ad ogni modo, prima poter trarre conclusioni definitive sarà necessario effettuare la simulazione su una geometria più simile al caso reale. Ciò non è stato ad oggi possibile poiché la versione del codice NEPTUNE rilasciata all'ENEA dagli sviluppatori non è in grado di utilizzare l'architettura Infiniband® presente sul sistema di calcolo ad alte prestazioni CRESCO. Questo ha impedito di poter utilizzare tale sistema al massimo delle sue capacità. Tale criticità dovrebbe essere superata allorché la nuova versione del codice sarà rilasciata ad ENEA dai suoi sviluppatori.

Per quanto riguarda l'utilizzo di TRIO_U, tale codice è stato utilizzato per l'analisi del distacco di bolle da una parete riscaldata. Si è analizzata la dipendenza del diametro al distacco e della frequenza di distacco da parametri

quali l'accelerazione di gravità, la tensione superficiale e l'angolo di contatto. I risultati di tale analisi sono risultati in accordo con correlazioni empiriche e con simulazioni numeriche 2D Lattice Boltzmann.

Per quanto riguarda l'integrazione dei codici all'interno della piattaforma NURISP, è qui opportuno ricordare che i codici citati sono sviluppati da CEA e EDF. La loro integrazione con la piattaforma SALOME e con gli altri codici è pertanto compito specifico di tali sviluppatori. Nel corso del presente lavoro si è tuttavia dimostrato come sia possibile ottenere un certo livello d'integrazione tra codici di tipo open-source. A tal fine si è studiata l'integrazione all'interno di SALOME di codici quali SATURNE e SYRTHES, nati per applicazioni nucleari e successivamente rilasciati come software open-source dai rispettivi sviluppatori. SATURNE è un codice CFD ai volumi finiti mentre SYRTHES è un solutore agli elementi finiti per problemi di scambio termico e di massa. Nel presente lavoro si è studiata l'integrazione di SATURNE all'interno di SALOME, mostrando come rendere accessibile questo codice dalla GUI (Graphical User Interface) di SALOME ed integrando i formati di input/output nei formati standard supportati da quest'ultimo. La possibilità di integrare SATURNE e SYRTHES all'interno di SALOME è stata infine considerata.

A.4 Modellistica e codici per l'analisi di incidenti severi [Report RdS/2012/09]

La Task LP2-A.4 ha visto il contributo di CIRTEN, specificatamente dell'Università di Bologna e dell' Università di Pisa nella preparazione di un input deck per il codice ASTEC e per il codice MELCOR con il quale si è analizzato l'esperimento FPT3 della facility PHEBUS. L'Università di Bologna ha quindi analizzato la fase di degradazione del bundle, di rilascio dei prodotti di fissione e di trasporto degli stessi attraverso il circuito sperimentale. L'Università di Pisa è andata oltre al lavoro svolto dall'Università di Bologna analizzando anche il comportamento dei prodotti di fissione nell'edificio di contenimento, la chimica dello iodio e il lavaggio.

Per entrambe le applicazioni si sono confrontati i calcoli con i risultati sperimentali e si sono messi in luce i punti di forza e le debolezze che richiederanno ulteriori approfondimenti e/o sviluppi del codice ASTEC e del codice MELCOR.

B. Analisi di sicurezza di reattori avanzati ed evolutivi

B.1 Identificazione ed analisi di possibili sequenze incidentali severe [Report RdS/2012/010]

La Task LP2-B.1 ha visto il contributo di CIRTEN-Università di Pisa nella preparazione di un input deck per il codice MELCOR con il quale si è analizzato una tipica sequenza incidentale severa di station black-out - cioè perdita totale di alimentazione elettrica- causata da un evento esterno in un reattore evolutivo di terza generazione. In stretta interazione con ENEA è stato messo a punto un modello dell'impianto Mille600 per il codice MELCOR v. 1.8.6. L'attività di sviluppo ha preso avvio da un input deck dell'edificio di contenimento fornito da ENEA a cui il CIRTEN ha aggiunto core, circuito primario e secondario. Questo modello integrale dell'impianto è stato applicato alla simulazione di una sequenza incidentale severa successiva alla perdita completa dell'alimentazione elettrica esterna ed interna all'impianto. I risultati più significativi della sequenza, come la tempistica dello scoprimento del core, la risposta in pressione del contenimento e la produzione e diffusione dell'idrogeno, sono stati analizzati in dettaglio, mentre gli aspetti fenomenologici più importanti come l'ossidazione della guaina ed il miscelamento dei gas nel contenimento sono stati messi in evidenza. Pur in assenza dei sistemi di iniezione di emergenza e delle logiche di controllo che in questa simulazione preliminare non sono stati considerati, la sequenza simulata ha fornito risultati fisicamente plausibili, pertanto il modello sviluppato rappresenta un'ottima base per future attività di approfondimento.

B.2 Valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi a fronte di sequenze incidentali rilevanti ai fini della sicurezza [Report RdS/2012/011]

Il contributo CIRTEN-Università di Roma "Sapienza" ha riguardato diversi punti sviluppati nel corso dello studio. Nella descrizione dei sistemi di sicurezza, sia attivi che passivi, per la rimozione del calore residuo implementati nei reattori di ultima generazione, L'università si è rivolta in particolare al Passive Core Cooling System (PXS) per quanto riguarda AP 1000, al sistema SIS/RHRS (Safety Injection System/Residual Heat Removal System) per EPR e all'Isolation Condenser per ESBWR. Sulla base della definizione degli stress test, tesi alla valutazione dei margini di sicurezza dell'impianto a fronte di eventi naturali catastrofici e con riferimento principalmente al reattore EPR, sono quindi state individuate e definite le sequenze incidentali rilevanti che possono portare a significativo degrado del core, come SBO (Station Black Out) e conseguente LUHS (Loss of Ultimate Heat Sink), come conseguenza di eventi iniziatori analoghi a quelli verificatisi a Fukushima. Particolare enfasi è stata posta sulle funzioni di sicurezza e particolarmente sui sistemi di sicurezza designati alla rimozione del calore di decadimento.

Attraverso l'effettuazione di analisi di tipo probabilistico comparativo è stata esaminata l'influenza relativa all'utilizzo dei sistemi attivi e passivi, rispettivamente per EPR e AP1000, sulla sequenza incidentale e la

valutazione delle conseguenze in termini di CDF (Core Damage Frequency) per entrambi i casi. Le analisi hanno prodotto valori dello stesso ordine di grandezza e quindi i due reattori con l'adozione di sistemi di emergenza attivi e passivi presentano margini di sicurezza comparabili, sebbene a spese di una elevata ridondanza nella configurazione di EPR. A questo riguardo, si è sottolineato il rischio di guasti comuni (per Fukushima fu l'inondazione), che possono interessare tutti i sistemi interessati contemporaneamente. Al fine di ridurre il rischio di guasti di causa comune si raccomanda l'adozione dei criteri di diversificazione, separazione ed indipendenza nel progetto di questi sistemi.

B.3 Valutazione del comportamento incidentale di reattori SMR [Report RdS/2012/013]

L'attività del CIRTEN-Università di Pisa in due fasi. Nella prima si è svolta una analisi preliminare delle principali caratteristiche degli SMR ad oggi in fase di studio e/o sviluppo concettuale sulla base dei dati disponibili in letteratura dei progetti relativi. In particolare modo, dal punto di vista tecnico scientifico, nella scelta dei tipi di SMR da esaminare si è fatto riferimento alle caratteristiche di sicurezza (previste o da adottare), di ridotta complessità e dimensioni del progetto, di manutenzione (qualora informazioni in merito siamo state reperite in letteratura) e di efficienza energetica.

Nella seconda fase si è applicata una metodologia che nella prospettiva di un proseguo di questa attività permetta di valutare concretamente l'adeguatezza dei progetti di reattore prescelti e le possibilità di impiego a tal fine dei mezzi disponibili. In particolare si è seguito un approccio "neo-deterministico" con l'intento di valutare la capacità resistente del reattore nel caso di accadimento di un evento naturale base di progetto, quale il flooding o il terremoto, o di un evento estremo quale il terremoto di intensità superiore al limite di progetto, o lo tsunami, o la combinazione di entrambi.

Come applicazione si sono valutati gli effetti indotti da un evento esterno del tipo avvenuto a Fukushima (tsunami) sulla resistenza dell'edificio del reattore (RB), dell'impianto innovativo (NTDR che può essere considerato anche SMR) IRIS. In ottemperanza alle disposizioni comunitarie indicate nel documento finale sugli stress test, il carico accidentale indotto dall'evento esterno è stato incrementato progressivamente in modo da valutare ad ogni incremento la risposta dinamica dell'impianto. I risultati ottenuti, seppur preliminari e nelle ipotesi adottate con riferimento al reattore IRIS, hanno sottolineato il ruolo fondamentale della struttura e geometria dei sistemi di contenimento la cui sollecitazione è risultata, come era prevedibile, dipendente dall'altezza dell'onda di flooding ed agli effetti della pressione idrodinamica esercitata sulle pareti. Ulteriori sviluppi futuri sono auspicabili per questo studio in modo da poter considerare appieno l'impatto delle onde, mediante un'opportuna analisi di più completa interazione fluido-struttura, nonché l'effetto dei detriti trasportati dallo tsunami, due aspetti entrambi fondamentali per poter valutare in maniera più completa le prestazioni dell'impianto nucleare considerato.

C. Progettazione simulatori ingegneristici

C.1 Progettazione simulatori incidentali per sistemi integrati di gestione incidenti nucleari [Report RdS/2012/016]

Il CIRTEN - Università di Pisa (Gruppo di Ricerca Nucleare di San Piero a Grado) ha strettamente collaborato con il laboratorio UTFISST-SIMING del Centro Ricerche Casaccia per le attività relative a questa task e dettagliatamente descritte nella sintesi generale riportata in precedenza. In particolare il contributo CIRTEN ha riguardato i diversi punti dell'attività focalizzandosi sui seguenti aspetti:

- Definizione di un razionale sulla stima del Termine di Sorgente
- Ricerca dati disponibili per la simulazione della tipologia di reattori russi ad acqua presurizzata VVER (*Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor)*
- Selezione dei codici di calcolo e della loro logica di utilizzo in particolare riguardo la capacità predittiva
- Definizione ed analisi di un caso demo

C.2 Progettazione di simulatori ingegneristici avanzati per reattori LWR evolutivi [Report RdS/2012/016]

Il contributo di CIRTEN-Politecnico di Milano alla task si è articolato principalmente su due linee di attività.

La prima ha riguardato l'analisi dell'incidente di Fukushima in termini di "lessons learned" alla luce dei risultati degli stress test effettuati sui reattori nucleari di potenza nell'Unione Europea. Attraverso un'analisi delle varie fasi dell'incidente, sono stati iidividuati i miglioramenti progettuali suggeriti dall'incidente di Fukushima. I consigli, o "lessons learned", scaturiti dall'evento di Fukushima e presi in conto, fanno riferimento alle linee guida emesse dal governo giapponese, dall'IAEA e dalla Nuclear Regulatory Commission degli Stati Uniti. Per ciascuno dei tre livelli di difesa in profondità (protezione, mitigazione e risposta all'emergenza nucleare) sono state considerate le raccomandazioni dei vari enti. Successivamente sono stati analizzati i risultati del processo di controllo dello stato degli impianti nucleari in Europa effettuato da ENSREG (ente che raggruppa i principali enti regolatori europei),

aventi come oggetto i margini di sicurezza delle centrali alla luce degli eventi successi a Fukushima (eventi naturali quali terremoti e inondazioni, perdita di fornitura elettrica, gestione incidenti severi, ecc).

Nella seconda parte si sono definiti i reattori di riferimento per lo sviluppo di simulatori ingegneristici, rappresentati dai sistemi di quarta generazione raffreddati a piombo (il reattore dimostrativo ALFRED e quello di ricerca MYRRHA) e dal reattore di ricerca ad acqua leggera TRIGA, presente al laboratorio LENA dell'Università di Pavia. Infine sono stati individuato i modelli, moduli e codici numerici che possono essere inseriti in simulatori ingegneristici, sviluppati al Politecnico di Milano, per le suddette tipologie di reattore. In particolare per i sistemi LFR è stato proposto un simulatore nell'ottica "*object-oriented*" ideato per la progettazione del sistema di controllo del reattore ALFRED. A seguire si sono proposti modelli zero-dimensionali, "*object-oriented*" e multi-fisici per il reattore TRIGA, oltre che librerie espressamente pensate per componenti di reattori SMR.

D. Attività sperimentali a supporto degli studi di sicurezza

D.2 Prove sperimentali e verifiche analitiche su componenti critici per la simulazione di SMR [Report RdS/2012/019 e RdS/2012/020]

Le attività realizzate dal CIRTEN per questo obiettivo riguardano le fenomenologie relative a due componenti considerati particolarmente critici per le caratteristiche di sicurezza in reattori SMR: downcomer-fondo vessel e generatore di vapore.

Lo studio realizzato dal DIMNP (Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione) dell'Università di Pisa si è rivolto, in continuità con le attività svolte nei precedenti PAR, alle problematiche di miscelamento del boro nel fondo vessel. Un approfondita conoscenza di questo fenomeno è necessaria per accertare l'affidabilità dei sistemi basati sull'iniezione di boro, utilizzati in diversi progetti per la ridondanza e diversificazione dello spegnimento del reattore in progetti innovativi di tipo SMR sia in condizioni di funzionamento nominale sia in condizioni incidentali di perdita di refrigerante. A questo scopo è stata condotta una campagna sperimentale su un mock-up che simula il downcomer e il lower plenum di un PRW (Pressurized Water Reactor) SMR in scala 1/5 che ha prodotto importanti dati per lo studio del fenomeno in condizioni di SB-LOCA (Small Break Loss Of Coolant Accident) e per la validazione di codici commerciali CFD (Computational Fluid Dynamic) per la simulazione.

Il comportamento termo-idraulico del circuito che alimenta il mock-up è stato simulato attraverso calcoli di pre-test realizzati con il codice di sistema RELAP5 per definire la corretta procedura sperimentale. In particolare è stata valutata la massima portata di alimentazione per non eccedere la pressione di progetto. Simulazioni condotte con il codice CFD FLUENT hanno procurato informazioni cica il campo di flusso e di temperatura che hanno permesso di posizionare le termocoppie nelle posizioni più significative. Queste simulazioni hanno mostrato un forte influenza della velocità di iniezione dell'acqua fredda sui vortici che si creano nel lower plenum all'ingresso del core. L'effetto principale è di deflettere radialmente il flusso determinando una forma ad "U" nella distribuzione di temperatura.

Benché i quattro test effettuati abbiano confermato il miscelamento termico previsto dai calcoli i prossimi test dovranno essere effettuati con una maggiore differenza di temperatura tra flusso di acqua calda e fredda. In questo modo la non uniformità della distribuzione di temperatura risulterà enfatizzata.

Il Politecnico di Milano ha portato avanti un'attività di ricerca sul comportamento del flusso monofase e bifase in tubi elicoidali di generatori di vapore innovativi. Le attività di R&D hanno contemplato sia una campagna sperimentale realizzata sulla facility a doppio tubo dei laboratori SIET sia sviluppo e validazione di modelli numerici.

Un primo studio è stato condotto sulla base dei test sperimentali condotti nel PAR2008-09 e solo parzialmente analizzati. Una rilevante quantità di dati sperimentali era disponibili per flusso monofase e bifase in regime laminare e turbolento relativamente a perdita di pressione, onde di densità e instabilità di tipo Ledinegg. Le analisi hanno permesso di definire le caratteristiche portata-perdita di pressione in un ampio intervallo di pressioni, di confermare il particolare comportamento del limite di stabilità in geometria elicoidale a bassa pressione e portata, e di tracciare mappe con regioni di stabilità ed instabilità nel piano adimensionale Nsub-Npch. (Npch: phase change number, Nsub: subcooling number).

Un altro studio è stato focalizzato allo sviluppo e validazione di un modello CFD sui dati ottenuti dalla facility sperimentale in SIET. Questo modello sarà utilizzato per la simulazione di differenti geometrie e condizioni al contorno per supportare progetto di scambiatori innovativi a tubi elicoidali. Il codice commerciale FLUENT è stato utilizzato per testare diversi modelli di turbolenza, in particolare lo Standard RNG, modelli k-ε, Shear Stress

Transport (SST), il modello k-ω ed il Reynolds Stress Model (RSM). Inoltre, un'attenzione particolare è stata posta sui diversi tipi di "wall function" utilizzati poiché sembrano influenzare fortemente i risultati del calcolo.

Infine l'ultima parte delle attività è stata dedicata specialmente all'investigazione della sovrapposizione delle instabilità del tipo DWO (Density Wave Oscillations) e del tipo Ledinegg. Questa fenomenologia individuata nelle precedenti prove sperimentali a bassa pressione, in cui comparivano instabilità del tipo Ledinegg, è stata ulteriormente investigata attraverso una nuova campagna sperimentale e la sua interpretazione con un modello analitico a parametri concentrati. Il confronto tra dati sperimentali e valori calcolati mostra che il modello stima che le instabilità si verifichino per valori inferiori della frazione di vuoto. Inoltre per portate medio-alte anche l'accordo qualitativo (forma della curva di confine sulla mappa di stabilità) non è soddisfacente. Il confronto migliora decisamente ad alta pressione dove il modello di flusso bifase omogeneo alla base del modello analitico utilizzato è più accurato.

D.3 Sviluppo strumentazione speciale per impianti sperimentali [Report RdS/2012/23]

Per lo sviluppo di una strumentazione innovativa per la misura di portate bifase il CIRTEN-Politecnico di Torino ha effettuato la caratterizzazione di uno Spool Piece costituito da un venturi classico e da un Wire Mesh Sensor. Questa strumentazione è stata installata nel circuito situato presso il laboratorio del Dipartimento Energia in un condotto orizzontale interessato dal deflusso di una miscela aria-acqua che ha consentito di realizzare un deflusso bifase aria-acqua in un ampio range di portate, permettendo lo studio di deflussi caratterizzati da differenti condizioni fluidodinamiche. Lo studio ha consentito di approfondire i lavori effettuati dal Politecnico di Torino nell'ambito dell'attività LP2 "Reattori evolutivi INTD", e in particolare nell'ambito della scelta degli strumenti da installare nelle linee di rottura di SPES3 con l'obiettivo di misurare la portata massica bifase delle due fasi che transita nelle linee durante i transitori incidentali.

L'analisi dei segnali elettrici, relativi agli strumenti dello Spool Piece, ha permesso di caratterizzare il deflusso bifase in termini di flow pattern e portate delle singole fasi. Il modello sviluppato ha permesso di stimare la portata totale della miscela bifase con un errore che nell'84% dei casi è inferiore al 20% e nel 73.3% dei casi è inferiore al 10%, in un ampio range di variazione del titolo. Le incertezze maggiori concernenti la stima della portata massica di aria, risultano comunque inferiori al 30% nel 73.3% dei casi e inferiori al 20% nel 53.5% dei casi testati. Gli errori maggiori sulla stima delle grandezze fluidodinamiche si hanno in corrispondenza dei regimi di deflusso intermittenti; per alti valori del titolo e di grado di vuoto, corrispondenti al range di misura di interesse per l'installazione nello SPES3, il modello consente di ottenere incertezze sulla stima di titolo e portata di liquido sempre inferiori al 10% e inferiori al 20% nella stima della portata massica della fase aeriforme.

Il modello di analisi sviluppato consente, oltre che di stimare le portate delle due fasi, di ottenere importanti informazioni sulle caratteristiche fluidodinamiche della miscela. Infatti, una metodologia per l'identificazione del flow pattern è stata sviluppata e analizzata. Dall'analisi della variazione temporale dei segnali e dall'analisi in frequenza, per ogni tipologia di deflusso, sono stati estratti i parametri fluidodinamici di riferimento, quali le frequenze caratteristiche i profili cordali del grado di vuoto e l'evoluzione dell'interfaccia.

Sebbene il lavoro richieda ulteriori approfondimenti, la strumentazione e la metodologia di analisi sviluppata vengono proposte come possibile soluzione per la misura delle grandezze bifase nello SPES3.

D.4. Adeguamento dello SPES2 per prove di sicurezza [Report RdS/2012/026]

Il contributo del CIRTEN-Università di Palermo per questo obiettivo è stato finalizzato alla messa a punto di un modello TRACE della facility SPES2 sulla base di un modello RELAP fornito da ENEA. Tale modello è stato utilizzato per la simulazione di un transitorio di perdita totale d'alimentazione elettrica (Station Black Out SBO), tipo Fukushima.

Il modello RELAP sviluppato per simulazione di un transitorio di IBLOCA (Intermediate Break Loss of Coolant Accident) è stato revisionato per costruire quello di TRACE con l'ausilio del software SNAP capace di operare sugli input di entrambi i codici. In particolare, si sono selezionati i componenti TRACE più adatti a simulare le varie parti dell'impianto: sistema primario, sistema secondario e contenimento compresa la piscina IRWST (In-containment Refuelling Water Storage Tank), e) si sono modificate alcune logiche di intervento e funzionamento di componenti quali valvole, pompe e riscaldatori per imporre le condizioni del tranditorio di SBO.

La simulazione del transitorio incidentale è stato effettuato dopo una breve riproduzione del funzionamento in regime stazionario dell'impianto per 500 secondi che ha fornito dei risultati in buon accordo sia coi dati sperimentali sia coi valori ottenuti con il codice RELAP dall'ENEA. Il transitorio condotto per 25000 secondi mostra che l'intervento dei sistemi di sicurezza passivi di cui è dotata la facility permette di assicurare la rimozione del calore residuo e le temperature del fluido primario si stanno lentamente stabilizzando. Questi risultati sembrano

confermare l'idoneità globale dell'impianto alla realizzazione di transitorio tipo Fukushima preso in considerazione. Ulteriori indagini sono comunque necessarie per l'approfondimento dei fenomeni locali che determinano asimmetrie in alcune componenti della facility.

E. Studi di sicurezza relativi ai depositi di rifiuti radioattivi

E.1 Performance assessment di depositi superficiali e geologici per il confinamento di rifiuti radioattivi [Report RdS/2012/028 e RdS/2012/030]

Nel primo triennio di attività il tema è stato sviluppato per depositi superficiali di rifiuti a bassa e media attività. A partire da quest'anno, in continuità con gli studi impostati negli anni precedenti per i depositi superficiali, è stato avviato il lavoro di sviluppo di conoscenze, competenze e strumenti modellistici e computazionali per l'analisi del rischio di un deposito geologico per il confinamento di rifiuti radioattivi ad alta attività e/o lunga vita, partendo dalla metodologia e dalle competenze consolidate per i depositi superficiali. In particolare, sono stati avviati i seguenti lavori: i) il recupero e la sintesi delle informazioni esistenti a livello nazionale ed internazionale sui depositi geologici profondi per rifiuti radioattivi ad alta attività e vita lunga e ii) lo sviluppo del contesto metodologico di performance assessment probabilistica specifico per un deposito geologico profondo, con particolare attenzione alla definizione delle necessarie ed adeguate procedure di analisi di sensitività e delle incertezze e loro verifica con riferimento ai modelli disponibili grazie agli sviluppi delle precedenti annualità.

Nella prima parte del rapporto RdS/2012/028 sono illustrate le principali caratteristiche strutturali di un deposito geologico profondo e i principali processi fisico-chimici coinvolti nel rilascio e nella migrazione dei radionuclidi. La raccolta di tali informazioni ha permesso di evidenziare i) una similarità di base nelle caratteristiche delle matrici rocciose, dei materiali e dei processi coinvolti, ma anche ii) una serie di caratteristiche e processi peculiari dei depositi geologici profondi rispetto a quelli superficiali, di cui è fondamentale tener conto per estendere gli approcci computazionali sviluppati per i depositi superficiali nel corso delle precedenti annualità della collaborazione.

Nella seconda parte del rapporto, sono presentate due metodologie per l'analisi di sensitività e delle incertezze aleatorie ed epistemiche, cioè, rispettivamente, l'analisi di Sensitività a Range Nominale e la tecnica del Subset Sampling. Tali procedure sono state provate utilizzando, senza perdita di generalità e per convenienza, dati, modelli e codici di calcolo del rilascio e trasporto di radionuclidi sviluppati nelle precedenti annualità. Questo ha permesso di concentrarsi sullo sviluppo delle procedure e dei metodi, e sulla loro verifica.

L'analisi di Sensitività a Range Nominale (NRSA) è applicata ad un caso realistico di rilascio da un deposito in un acquifero profondo eterogeneo bidimensionale. Nonostante la complessità del codice di calcolo impiegato, la semplicità e la flessibilità del NRSA hanno permesso di ottenere risultati significativi in tempi accettabili.

La tecnica Subset Sampling (SS) è stata applicata per la stima di probabilità basse dell'evento di superamento delle soglie di dose nel caso di rilascio da un deposito in un acquifero monodimensionale. La propagazione delle incertezze nei parametri che governano la modellazione probabilistica dei processi di rilascio all'uscita del modello di deposito ha permesso di stimare la probabilità che la dose superi le soglie di sicurezza prestabilite. Il confronto dei risultati del metodo SS con quelli del classico metodo Monte Carlo standard ne ha dimostrato l'efficienza superiore.

Per l'analisi di sicurezza di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività si prendono in considerazione tutta una serie di scenari, sia in condizioni normali sia in condizioni incidentali derivate da eventi esterni. Nell'ambito dei possibili eventi esterni sono stati valutati gli effetti di un impatto aereo sul deposito superficiale (strutture ingegneristiche in calcestruzzo e acciaio) e sui manufatti in esso contenuti.

In accordo con le linee guida internazionali, è stato considerato l'impatto di un aereo militare o civile (considerato come evento 'beyond design basis') su un impianto di smaltimento della tipologia del deposito di El Cabril (Spagna), molto simile a quello di cui si parla per l'Italia.

I carichi dinamici/impulsivi nonché il carico termico, a causa della combustione del carburante, sono stati valutati in modo preliminare per determinare la capacità del deposito di sopportare senza danni tutti gli effetti (primari e secondari) della caduta dell'aereo .

E.2 Monitoraggio dei depositi di rifiuti radioattivi [Report RdS/2012/031, RdS/2012/032 e RdS/2012/034]

In prosecuzione delle attività avviate per il PAR 2008-09, il contributo del CIRTEN è consistito nello sviluppo ed approfondimento degli aspetti metodologici di tipo hardware e software finalizzati alla misura del trizio e dell' ^{129}I nelle acque e del ^{14}C nell'aria. Il processo di misura è da caratterizzare e progettare in un contesto di monitoraggio

in cui le sorgenti che generano il rilascio sono dei depositi di rifiuti radioattivi con definite ipotesi sulle barriere di confinamento.

E' stato quindi prodotto un rapporto comune ENEA-CIRTEN [RdS72012/031] dove vengono delineati gli aspetti propedeutici allo sviluppo di un programma di monitoraggio ambientale relativo ad un deposito di rifiuti radioattivi superficiale. Viene inoltre definita la strategia per affrontare il tema del monitoraggio di un deposito di rifiuti radioattivi quali i differenti obiettivi del monitoraggio nelle diverse fasi di realizzazione del sistema di smaltimento, le matrici ambientali che è necessario monitorare ed i punti di campionamento essenziali da predisporre. La definizione di tali procedure e parametri viene elaborata in base a normative internazionali IAEA e alle esperienze già sviluppate in questo settore in ambito europeo ed internazionale. Vengono infine approfondite le proprietà di alcuni radionuclidi: ^{129}I, ^{99}Tc, ^{14}C e ^{3}H, gas nobili, i quali presentano elevata mobilità che può risultare importante, in fase di monitoraggio ambientale, per valutare eventuali fuoriuscite dal deposito.

In parallelo a questa tematica è stata effettuata una attività di approfondimento dei processi di trasporto dei radionuclidi attraverso le barriere protettive e gli ambienti idrici sub-superficiali e profondi:

In un primo rapporto [RdS/2012/032] vengono descritti alcuni codici di calcolo relativi al trasporto e alla migrazione di radionuclidi nelle matrici ambientali e relativi a fenomeni geochimici. Di questi software sono state riportate le caratteristiche fondamentali, delineando i fenomeni che possono essere studiati applicandoli. Si riporta una classificazione per focalizzare l'attenzione sul fenomeno studiato da questi codici (trasporto di inquinanti o geochimica) e sull'approccio applicato (deterministico o probabilistico). Viene inoltre riportato un esempio applicativo dei codici Hydrus 1D ed Amber relativamente ad un sito analizzato dall'ENEA in passato come caso studio di ubicazione di un deposito di rifiuti radioattivi.

In un secondo rapporto [RdS/2012/034] è stato affrontato lo studio del trasporto e della destinazione degli inquinanti radioattivi nel suolo e sottosuolo tramite l'utilizzo della piattaforma software FRAMES ed in particolare del modulo MEPAS. La prima parte dell'opera è stata dedicata alla trattazione della radioattività, analizzandone gli aspetti generali e soffermandosi sul concetto di rifiuto radioattivo e sulla gestione e sullo smaltimento dello stesso. Si sono poi analizzati i principali modelli di trasporto per la valutazione del destino dei contaminanti nell'ambiente, fase complessa nella valutazione del rischio o in qualsiasi altra valutazione di impatto ambientale. Lo studio complessivo del problema ha richiesto la suddivisioni in tre momenti distinti, che si riferiscono al modello concettuale di analisi di rischio.

E.3 Caratterizzazione dei rifiuti radioattivi [RdS/2012/218]

L'attività svolta dal CIRTEN-Università di Pisa riguarda la parte relativa ai rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a ^{3}He. In particolare sono stati sviluppati alcuni sistemi di rivelazione basati sulle emulsioni surriscaldate che, pur non essendo un sostituto immediato degli ^{3}He, risultano molto promettenti per il futuro.

Il sistema contiene una fiala (rivelatore) con una emulsione estremamente fine (diametro circa 70 μm) di gocce surriscaldate di diclorodifluorometano disperse in una matrice di gel inerte quasi tessuto equivalente. I nuclei di rinculo ad alto LET, Linear Energy Transfer, prodotti dai neutroni possono far scattare l'ebollizione della goccia che cresce fino a diventare una bolla visibile. Per questi rivelatori sono stati proposti due sistemi di misura: uno acustico e l'altro luminoso. Il sistema acustico fornisce i conteggi tramite un sistema ad ultrasuoni mentre il sistema luminoso utilizza un sistema a LED, che illumina l'emulsione, e fotodiodo.

I rivelatori sono stati ampiamente testati presso i laboratori dell'Università di Pisa ed hanno dimostrato una buona affidabilità e stabilità in diverse configurazioni sperimentali e per diverse tipologie di flussi neutronici.

E.4 Tecniche innovative di trattamento, condizionamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi [RdS/2012/219]

L'attività svolta dal CIRTEN-Politecnico di Milano riguarda la valutazione delle interazioni tra una matrice di sodalite inglobante rifiuti salini derivanti da processi di elettroraffinazione in sali fusi ed il sito di smaltimento. A questo riguardo è stata condotta una serie di test di lisciviazione a tre diversi pH (acido, neutro e alcalino), allo scopo di evidenziare gli effetti che tale importante parametro può avere sul rilascio di elementi presenti nel rifiuto condizionato, con e senza l'aggiunta di vetro borosilicato.

Le prove di lisciviazione, condotte seguendo la norma ASTM C1285-02, si riferiscono a campioni di polveri preparati da ENEA secondo il processo "Pressureless Consolidation", messo a punto dall'Idaho National Laboratory negli USA..

In particolare, sono state studiate le tre seguenti matrici:

- sodalite costituita da nefelina e sali cloruri (SOD);

- vetro borosilicato (BG);
- miscela di sodalite e vetro borosilicato (SOD.BG).

Per ciascuna matrice sono state effettuate prove di lisciviazione a 90 ± 2 °C a tre valori di pH (4 - 7 - 10) e per tre tempi di contatto (1-7-15 giorni); inoltre la matrice SOD.BG è stata studiata anche a 23 ± 2 °C, a pH 7.

Lo studio effettuato ha evidenziato come un pH acido aumenti il tasso di lisciviazione per tutti gli elementi chimici presi in esame, mentre quest'ultimo tende a diminuire verso pH sempre più elevati, fatta eccezione, come da aspettative, per l'alluminio, a seguito del suo ben noto carattere anfotero. Il rilascio aumenta inoltre, come è logico, con l'aumentare della temperatura, passando da quella ambiente a 90 °C. Va inoltre rilevato come il comportamento degli ioni salini introdotti con la miscela di rifiuti sia coerente con la natura degli stessi: si nota così un maggior rilascio per gli ioni monovalenti di elementi alcalini (rubidio e cesio), più difficili da trattenere e conseguentemente più "mobili" nell'ambiente; un rilascio intermedio per gli ioni bivalenti dei metalli alcalino-terrosi (stronzio e bario); un rilascio minore per gli ioni trivalenti dei metalli delle terre rare (neodimio), con l'eccezione del lantanio, che presenta, a pH acido, un rilascio maggiore rispetto a quello che ci si sarebbe potuto attendere.

LINEA PROGETTUALE 3: REATTORI DI IV GENERAZIONE

A. Progettazione di Sistema

A.1 Sviluppo e validazione modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica di nocciolo LFR [Report RdS/2012/035, RdS/2012/036 e RdS/2012/037]

Il CIRTEN, con la supervisione ENEA ha collaborato nella implementazione di modelli di calcolo per la neutronica e la cinetica spaziale di nocciolo, con particolare riguardo all'applicazione di questi su sistemi refrigerati a piombo liquido.

In particolare, con il Politecnico di Torino si è proseguita l'attività di sviluppo di un codice di neutronica e termoidraulica accoppiate (FRENETIC) finalizzato all'analisi cinetica spaziale di un nocciolo LFR. Entrambi i moduli di neutronica e termoidraulica del codice sono stati preliminarmente validati indipendentemente assumendo come condizioni di riferimento problemi relativamente semplici di che presentano una soluzione analitica.

Per quanto riguarda i codici di neutronica, l'Università di Roma "La Sapienza" ha dato avvio ad una sistematica analisi di validazione e quindi di sviluppo del codice ERANOS, in particolare in rapporto al suo utilizzo sulla base della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) per i calcoli perturbativi generalizzati.

L'Università di Roma ha inoltre analizzato, mediante la metodologia GPT implementata nel codice ERANOS, e attraverso calcoli di simulazione numerica, la rilevanza di misure di quantità integrali in reattori veloci sperimentali (per esempio, l'effetto di vuoto del refrigerante) in rapporto ad analoghe quantità relative al reattore di riferimento. Per lo studio sono stati presi in considerazione il reattore GUINEVERE, come rappresentativo di una facility sperimentale, e il reattore veloce refrigerato a piombo ELSY come sistema di riferimento.

A.2 Sviluppo e validazione di codici per la termoidraulica di sistemi LFR [Report RdS/2012/039, RdS/2012/040]

Nell'ambito di questa attività, CIRTEN-Università di Bologna ed ENEA hanno proseguito sullo sviluppo del codice FEM-LCORE. Il codice FEM-LCORE permette una descrizione 3-D del nocciolo del reattore a piombo mediante un approccio a sistemi porosi. Il codice, integrato nella piattaforma SALOME (che ne permette il lancio e la configurazione tramite SALOME-GUI), ha permesso di studiare alcune condizioni incidentali relative al core di un LFR, studiando in particolare i transitori incidentali relativi al parziale flow-blockage di un elemento di combustibile. Si è studiata inoltre la possibilità di utilizzare architetture di calcolo ibride che accoppino il calcolo parallelo su GPUs (Graphical Processor Unit) con CPUs multi-core. Infine si è valutata la possibilità di accoppiare il codice FEM-LCORE con un codice di sistema quale CATHARE. Con tale approccio il core e l'upper plenum vengono simulati con una approccio 3D a mezzo poroso nel codice FEM-LCORE, mentre il resto del sistema (sistema primario) mediante un approccio 1D con il codice CATHARE.

Il CIRTEN-Politecnico di Torino, relativamente allo sviluppo e validazione di codici di termoidraulica di sistema, ha preliminarmente validato il codice FRENETIC (vedi anche obiettivo A1) nella sua componete termoidraulica. Obiettivo della attività è stata la validazione del modulo termoidraulico mediante l'utilizzo dei dati sperimentali disponibili dall'esperimento ICE realizzato sulla facility CIRCE (ENEA).

A.3 Concettualizzazione del DEMO LFR [Report RdS/2012/041]

Relativamente alla concettualizzazione del nocciolo di DEMO, ENEA e CIRTEN-Università di Bologna hanno prodotto un Report congiunto che descrive le considerazioni, le analisi neutroniche, termoidrauliche e termomeccaniche preliminari, svolte a supporto della concettualizzazione del nocciolo di una nuova configurazione di un reattore. Partendo dalla configurazione di DEMO disponibile, e modificati i principali parametri di nocciolo, si è giunti alla configurazione proposta per AFRODITE (Advanced lead-cooled Fast Reactor Oriented to the Demonstration of Innovative Technologies). Dalle analisi preliminari condotte, la configurazione proposta sembra soddisfare tutti gli obiettivi di dimostrazione, rispettando al contempo tutti i vincoli fissati ex-novo, coerentemente con l'obiettivo di semplificare le richieste tecnologiche per accelerare la realizzabilità del reattore.

A.4 Reinterpretazione campagne sperimentali TAPIRO in appoggio alla progettazione dei sistemi [Report RdS/2012/042]

CIRTEN-Università di Roma "La Sapienza" ha collaborato con ENEA alla realizzazione di un modello di simulazione Monte Carlo (MCNPX) del reattore TAPIRO su cui sono state riprodotte una serie di misure (traverse di fissione e di reazioni di cattura) nei canali sperimentali Diametrale, Radiale 1 e Tangenziale, per la reinterpretazione della campagna sperimentale effettuata negli anni '80 sul reattore veloce TAPIRO da ENEA e SK-CEN. Il lavoro svolto permetterà di progettare esperienze di supporto allo sviluppo di LFR, da tenere in TAPIRO, che siano rappresentative del sistema sotto studio, tagliando costi di progettazione e realizzazione.

C Termoidraulica del Refrigerante

C.1 Implementazione laboratorio termoidraulica dei metalli liquidi [Report RdS/2012/050 e RdS/2012/052]

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si sono ulteriormente implementate le attività di ricerca e sviluppo per la caratterizzazione preliminare del GV proposto per l'impianto DEMO-LFR ALFRED, che prevede l'utilizzo di tubi a baionetta a doppia parete con interposta intercapedine conduttiva.

ENEA, Università di Pisa e Università di Roma "La Sapienza", considerando un singolo tubo in scala 1:1, hanno realizzato analisi numeriche parametriche con codice di sistema (RELAP5) incentrate sia sul tipo di riempitivo adottato che sui sistemi di isolamento fra l'acqua di alimento e il vapore surriscaldato in uscita al sistema.

Le simulazioni realizzate hanno quindi supportato la concettualizzazione e progettazione della sezione di prova, e la concettualizzazione e progettazione della facility HERO (Heavy liquid mEtal – pRessurized water cOoled tube facility).

L'Università di Pisa ha quindi realizzato una serie di calcoli numerici mediante codice di fluidodinamica computazionale, per la simulazione analitica del singolo tubo, in supporto alla fase progettuale, costruttiva e sperimentale della facility HERO.

L'Università di Pisa -GRNSPG ha invece pianificato e avviato una attività di "code-coupling" tra codici di sistema e codici di fluidodinamica computazionale (CFD).

Il lavoro svolto nell'ambito di questo sotto-obiettivo, ha previsto prima una review di letteratura per descrivere lo stato dell'arte circa l'accoppiamento di codici, e successivamente si è sviluppato un strumento di accoppiamento esplicito fra codice di sistema e CFD applicato ad un problema semplice, dimostrando la ottima qualità dei risultati ottenuti quando confrontati con simulazioni "stand-alone".

C.3 Qualifica sistema DHR per impianti LFR [RdS/2012/057]

Nell'ambito delle attività di caratterizzazione sperimentale del prototipo di DHR da 800 kW installato sull'impianto a metallo liquido pesante CIRCE in configurazione di prova ICE (INTEGRAL CIRCULATION EXPERIMENT), sono state realizzate diverse sessioni sperimentali.

In supporto all' attività sperimentale, CIRTEN-Università di Pisa ha realizzato una accurata analisi numerica che ha supportato la re-definizione e il miglioramento della sezione di prova ICE. Lo scopo è stata la investigazione del sistema a piscina CIRCE in regime di circolazione naturale in scenario DHR, valutando la stratificazione termica in piscina.

L'analisi è stata realizzata sviluppando un accoppiamento fra codici di sistema (RELAP5) e codice CFD (Fluent) di tipo elementare (one-way). I risultati ottenuti non solo hanno supportato la implementazione della nuova sezione di prova ICE, ma hanno permesso di individuare le scale di tempo in gioco permettendo di definire una corretta procedura di prova.

C.4 Prove e calcoli di scambio termico in regime di circolazione mista: up-grade impianto NACIE [Report RdS/2012/058]

Per quanto concerne la realizzazione di prove di scambio termico e perdite di carico in regime di circolazione mista (transizione dalla circolazione forzata alla circolazione naturale), si sono definiti una serie di interventi da attuare sull'impianto NACIE, tra cui la installazione e strumentazione di un fuel pin bundle da 250 kW.

In preparazione degli esperimenti una serie di analisi numeriche di pre-test sono state realizzate da CIRTEN-Università di Pisa, mediante il codice di sistema RELAP5. L'obiettivo è stato quello di analizzare la risposta del sistema durante le prove di circolazione naturale che simulano uno scenario di perdita di portata nel fuel pin bundle.

Si sono inoltre implementati, in via preliminare e adottando una schematizzazione molto semplificata dell'impianto NACIE, una serie di calcoli di pre-test accoppiando il codice di sistema RELAP5 con il codice CFD FLUENT. I calcoli hanno dimostrato come l'accoppiamento RELAP5-CFD permette di simulare correttamente il comportamento della facility NACIE, sia in regime di circolazione naturale che circolazione assistita per iniezione di gas.

D Analisi di Sicurezza

D.2 Fuel - Cladding - Coolant Interaction [Report RdS/2012/064]

Nell'ambito dello sviluppo dei reattori LFR, ai fini della valutazione degli incidenti severi che portano al danneggiamento del combustibile, assumono particolare rilevanza le indagini sperimentali relative all'interazione tra il combustibile (UO2 e/o MOX fuel) ed il refrigerante (piombo fuso).

L'attività di ricerca implementata da CIRTEN-Politecnico di Milano si è posta come obiettivo l'individuazione dei composti chimici che in prima battuta si possono formare da un punto di vista termodinamico in un sistema di cui sia nota la composizione chimica iniziale insieme alle condizioni operative di funzionamento. Analogamente è stata considerata anche la condizione incidentale Unprotected Loss-of-Flow (ULOF). Mediante l'utilizzo di un opportuno codice di calcolo opportunamente adattato, che minimizza l'energia libera di Gibbs del sistema, è stato possibile ottenere informazioni sull'equilibrio all'asintoto del sistema-studio, a prescindere dai fenomeni chimico-fisici e dalla loro cinetica. In aggiunta, è stato proposto e avviato un interessante approccio teorico basato su metodi ab-initio che al momento è solo delineato e che necessita di un ulteriore sviluppo mirato a questo tipo di applicazione in ambito nucleare al fine di poter disporre di un'altra via per lo studio della problematica ed al contempo verificare la congruenza di risultati ottenuti seguendo approcci teorici diversi.

D.3 Rilascio e migrazione dei prodotti di fissione nei sistemi LFR [Report RdS/2012/232 e RdS/2012/068]

L'attività si è posta come obiettivo di valutare (delineando una apposita metodologia) il tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato di un sistema LFR.

CIRTEN-Università di Pisa ha proposto una metodologia per la valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione, che prevede l'utilizzo di un metodo di analisi completamente statistico basato sull'utilizzo di codici Monte Carlo, accoppiato con codici di fuel-pin-performance basati su modelli semi-empirici (approccio deterministico). La metodologia proposta, solo delineata, necessità di dati accurati circa il combustibile di un reattore LFR, come Linear-Heat-Rate (LHR), Spettro Neutronico, temperatura di camicia, pressione interna alla guaina, caratteristiche del combustibile (densità reale, porosità, granulometria, etc..), dati attualmente non disponibili. Il prossimo passo consiste quindi nella completa implementazione della metodologia proposta e alla sua validazione sfruttando i dati sperimentali relativi per esempio al combustibile nucleare utilizzato per SFR.

Relativamente al progetto concettuale e studio di fattibilità di una apparecchiatura sperimentale in cui simulare, in base al tasso di rilascio stimato, la migrazione dei singoli prodotti di fissione nel refrigerante primario, il trasporto in fase gassosa, la filtrazione e purificazione in fase gassosa, ENEA e CIRTEN-Politecnico di Torino hanno definito un progetto quasi ingegneristico dell'apparecchiatura che potenzialmente è in grado di evidenziare i fenomeni di rilascio lato combustibile e lato guaina. Il progetto proposto è idoneo a studiare il rilascio di prodotti gassosi intrappolati in matrici sinterizzate che simulano le pastiglie di combustibile irraggiato. L'apparecchiatura consente di caratterizzare il comportamento delle guaine per quanto riguarda i fenomeni di diffusione e permeazione attraverso la guaina, e di fornire informazioni sui fenomeni di corrosione all'interfaccia piombo liquido-guaina, e di fornire dati sui fenomeni di trasporto e migrazione di specie chimiche gassose rilasciate attraverso un'interfaccia liquido/gas, misurando l'evoluzione della composizione dell'atmosfera gassosa.

D.4 Analisi scenari incidentali su sistemi LFR [Report RdS/2012/069 e Report RdS/2012/072]

Nell'ambito dell'attività si sono analizzati i seguenti scenari incidentali.

- *Perdita di integrità del nocciolo* (attività congiunta ENEA / CIRTEN-Università di Pisa)

L'attività ha preso a riferimento il reattore veloce refrigerato a metallo liquido pesante MYRRHA FASTEF (Belgio, SCK-CEN), di cui sono disponibili dati geometrici e condizioni operative. Dopo aver simulato una condizione di normale funzionamento (steady state condition), necessaria per ottenere i corretti profili di temperatura nel combustibile, nella guaina e nel refrigerante, e le relative portate e velocità del metallo liquido attraverso le varie sezioni e componenti del sistema, si è realizzata una simulazione relativa ad un transitorio incidentale di perdita di portata (ULOF). I risultati ottenuti sono poi stati comparati con i calcoli realizzati con il codice di sistema RELAP5. Si è inoltre simulato un transitorio di "fuel dispersion", parametrizzando relativamente alla porosità del combustibile.

- *Valutazione delle interazioni fluido-struttura nei sistemi LFR (*CIRTEN-Università di Pisa*)*

L'attività ha riguardato la valutazione preliminare degli effetti strutturali (in termini di risposta globale del sistema) indotti da un terremoto di riferimento sui componenti "safety relevant" di un sistema nucleare LFR. La valutazione, realizzata con codice di dinamica strutturale, ha preso in considerazione i sistemi nucleari LFR oggetto dei progetti europei (ELSY/ALFRED), introducendo opportune ipotesi per la simulazione dinamica del refrigerante, del vessel e del contenimento.

L'analisi sismica, basata sul metodo della "Time History", ha studiato separatemene gli effetti sul contenimento, sul vessel del reattore, e sulle strutture interne del sistema, evidenziando come, nelle analisi future occorrerà valutare in maniera approfondita l'influenza degli isolatori sismici adottati, considerando anche le frequenze di accoppiamento tipiche del refrigerante.

SIET SpA

Le attività affidate alla SIET (Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche) nell'ambito del PAR 2011 sono relative alla sola linea progettuale LP2 per la quale i risultati raggiunti sono descritte di seguito,

D. Attività sperimentali a supporto degli studi di sicurezza

D.1 Verifiche analitiche a supporto di SPES-3, simulatore integrale di SMR [Report RdS/2012/017]

L'attività realizzata da SIET nell'ambito di questa task è focalizzata su simulazioni realizzate con il codice di sistema RELAP5 a supporto del progetto della facility SPES3. In particolare sono state simulati tre transitori sperimentali da condursi sulla facility: rottura della linea superiore EBT (Emergency Boration Tank) in condizioni BDBE (Beyond Design Basis Event), rottura singola della linea DVI da 1-inch (1-inch DVI line split break) in condizioni DBE (Design Basis Event), incidente di Fukushima (station black-out: loss off-site and on-site AC power). Lo scopo di queste simulazioni era una verifica che la configurazione progettata dell'impianto e dei sistemi di sicurezza fosse idoneo a far fronte a tali condizioni incidentali. Inoltre, la revisione finale del progetto meccanico ha richiesto una modifica dello spessore e dell'isolamento dei tubi degli scambiatori del EHRS (Emergency Heat Removal System), quindi si richiedeva una verifica che del nuovo progetto sulla potenza scambiata.

In tutti e tre i casi l'analisi della sequenza incidentale prevista dal codice RELAP5 ha mostrato la capacità dell'impianto SPES3 a far fronte alle condizioni incidentali. La sequenza di intervento dei sistemi di sicurezza di emergenza ha garantito il raffreddamento dell'impianto anche nelle condizioni più critiche. In particolare, la simulazione del transitorio di SBO tipo Fukushima ha mostrato che le caratteristiche dei sistemi di emergenza, basati sulla circolazione naturale e implementati in SPES3 sul modello di quelli previsti in un SMR di tipo PWR come IRIS, assicurano la rimozione del calore residuo anche nelle condizioni incidentali più critiche. I transitori di rottura linee, simulati con RELAP5 includendo il nuovo design degli scambiatori del sistema EHRS, hanno mostrato differenze molto piccole rispetto alle simulazioni effettuate con la configurazione originale del EHRS. Questi risultati confermano l'adeguatezza della nuova geometria del EHRS.

D.2 Prove sperimentali e verifiche analitiche su componenti critici per la simulazione di SMR [Report RdS/2012/017]

Il contributo SIET a questo obbiettivo coincide con le prove eseguite su prototipi di barre scaldanti realizzate dalla ditta Thermocoax (F), per verificare la loro adeguatezza per un eventuale utilizzo nel canale di potenza dell'impianto SPES 3. La campagna di prove di qualifica è stata eseguita presso l'impianto Circuito Prova Barre presso i laboratori SIET (Piacenza, I). L'attività sperimentale è stata finalizzata alla verifica sia delle caratteristiche meccaniche (deformazione, ovalizzazione, integrità strutturale, fessurazione della camicia esterna) ed elettriche (isolamento elettrico e resistenza interna) degli elementi scaldanti e delle loro termocoppie di parete, sia della potenza generata e dell'uniformità assiale del flusso nella parte attiva. A tale scopo le barre Thermocoax sono

state sottoposte alle prove di collaudo del circuito idraulico (Shakedown test) e alle prove con transitorio di pressione, potenza e temperatura atte a riprodurre le sollecitazioni termoidrauliche tipiche dei transitori SPES-3.

La sperimentazione sulle barre Thermocoax ha evidenziato sia aspetti positivi sia aspetti negativi. Fatto positivo è la limitata variazione di resistenza con la temperatura che comporta una variazione inferiore al 5% sia del valore della corrente sia del valore di tensione, entrambe entro i limiti tecnici dei generatori di potenza. Gli aspetti negativi riguardano la tecnologia di istallazione di queste termocoppie, che non può essere considerata affidabile per impieghi sull'impianto SPES-3.

D.3 Sviluppo strumentazione speciale per impianti sperimentali [Report RdS/2012/021 e RdS/2012/021]

Nell'ambito di questo obbiettivo già presente nel precedente PAR, la SIET ha sviluppato un prototipo di sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto di miscele bifase acqua-vapore. La prima fase delle attività, eseguite nel Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2008-09 aveva portato allo sviluppo di un primo prototipo, adatto ad operare a bassa temperatura e pressione. Nella seconda fase, portata avanti nel il PAR2011, si è sviluppato un prototipo adatto per operare alle condizioni prototipiche delle linee di rottura dell'impianto SPES3 (15 bar, 200°C). Tale prototipo, presenta una architettura hardware e software migliorata rispetto al precedente.

Il prototipo è stato inserito in un impianto sperimentale di prova già esistente, realizzato per effettuare test su prototipi di barre scaldanti per l'impianto SPES3. Tale circuito è in grado di realizzare le stesse condizioni termoidrauliche di funzionamento delle linee di rottura di SPES3, pertanto è stato possibile alimentare la sezione di prova con flussi acqua/vapore prototipici. Il circuito sperimentale, dotato di valvole rapide, ha consentito di eseguire misure di grado di vuoto volumetrico medio sui flussi bifase.

Le misure di grado di vuoto sono state correlate ai segnali della sonda capacitiva in modo da ottenere un modello predittivo sperimentale, requisito fondamentale per l'utilizzo della sonda nelle linee di rottura dell'impianto SPES3. La deviazione standard dell'errore di tale modello risulta essere pari a 7. E' stato considerato anche un modello predittivo più rigoroso per la ricostruzione della mappa tomografica che si basa sulla soluzione di un problema alle derivate parziali, noto in letteratura come CEM (Complete Electrode Model). Tale metodo richiede tuttavia l'elaborazione di metodi numerici per la realizzazione del corrispondente problema discreto, che non sono stati sviluppati in questa attività.

Il passo successivo di questa attività di ricerca dovrebbe riguardare la verifica sperimentale di uno SPOOL PIECE completo, costituito dalla sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto, da un misuratore di flusso della quantità di moto e da un misuratore di velocità, alle condizioni operative previste in SPES3. Una volta disponibili i dati sperimentali dei tre strumenti, si dovrebbero applicare le equazioni teoriche per la derivazione della portata massica. Per questa ragione sempre nel corso del PAR2011 SIET ha analizzato la disponibilità sul mercato di strumenti atti a misurare tali grandezze.

Per la misura del flusso della quantità di moto, dato che i drag disk non sono più disponibili sul mercato, è stato sviluppato presso la SIET un sistema simile che impiega come elemento sensibile un cella di carico a flessione stagna per applicazioni ad alta temperatura. Prove, volte a verificare l'affidabilità dello strumento ad alte temperature e pressioni, sono state effettuate presso i laboratori SIET ed hanno dimostrato la fattibilità d'impiego di tale strumento.

Per la misura della velocità media della miscela non sono disponibili sul mercato strumenti con fondo scala così ampio da poter coprire completamente i campi di velocità della miscela durante i transitori incidentali di SPES3. I misuratori ad ultrasuoni, presi preliminarmente in considerazione in alternativa ai misuratori a turbina, sono risultati essere inadeguati. Tra gli strumenti commerciali, i misuratori vortex sono risultati quelli con il campo di misura più ampio. Per effettuare la misura di velocità media della miscela durante i transitori incidentali in SPES3 è necessario utilizzare un vortex e un venturimetro, disposti rispettivamente a valle e a monte della valvola di rottura. Il vortex si utilizza quando la velocità della miscela risulta essere inferiore a 100 m/s, il venturimetro quando la velocità a valle è troppo alta per essere letta dal vortex e contemporaneamente il flusso a monte della valvola si mantiene monofase. Negli intervalli, in cui non è possibile utilizzare né il vortex a valle né il venturimetro a monte, la portata bifase può essere valutata combinando le misure degli altri due strumenti facenti parte dello SPOOL PIECE.

D.4 Adeguamento dello SPES2 per prove di sicurezza [Report RdS/2012/024 e RdS/2012/025]

Un'azione portata avanti da SIET nell'ambito di questo obbiettivo è stata dedicata alle attività amministrative e di manutenzione che devono essere effettuate sulla facility SPES-2, nella configurazione SPES-99, per simulare un esperimento di diluizione del boro in condizioni di massa ridotta. Le analisi di pre-test condotte da ENEA nel

PAR2008-09 avevano individuato in un transitorio tipo SBLOCA (Small Break Loss of Coolant), controparte del test OECD-PKL E2.2 effettuato sulla facility PKL NP.

Sono state individuate le azioni di verifica necessarie per soddisfare i requisiti di legge della direttiva europea sui contenitori in pressione, queste richiederebbero circa un anno per quanto riguarda il vessel del canale di potenza. Per gli altri componenti e le tubature servirebbero una serie di test non distruttivi da pianificare in parallelo alle verifiche sul vessel. E' inoltre stata verificata la fattibilità di ri-strumentare il fascio di barre elettriche, così come la sostituzione delle guarnizioni delle flange di accoppiamento con nuovo materiale resistente ad alta pressione e temperatura. Per finire si sono definite le modifiche specifiche della facility necessarie per l'esecuzione del test di diluizione del boro ed il sistema di misura per la rilevazione della concentrazione di boro.

Le attività di manutenzione straordinaria e sostituzione di alcuni componenti obsoleti, propedeutiche alla rimessa in esercizio dell'impianto SPES 2, sono state condotte da SIET in parallelo con lo studio di fattibilità del transitorio di diluizione boro. Il lavoro svolto ha consentito il miglioramento dell'affidabilità e della sicurezza, in particolare per quanto riguarda gli impianti elettrici a media ed alta tensione.

Le attività hanno riguardato hanno riguardato seguenti ambiti:

- Sostituzione dell'interruttore in media tensione (3000 V) che alimenta il trasformatore da 800 kWA per gli ausiliari d'impianto.
- Sostituzione del carica batteria che serve le batterie stazionarie fornitrici di tensione continua ai circuiti elettromeccanici dell'impianto SPES nonché all'interruttore in alta tensione ed ai sistemi ausiliari del nuovo trasformatore da 130KV, installato nel precedente PAR
- Montaggio di una recinzione di sicurezza della sottostazione elettrica in alta tensione.
- Verniciatura della struttura metallica che sostiene i conduttori dell'alta tensione.
- Acquisto ed immatricolazione di alcuni trasmettitori di pressione differenziale e relativa completi di accessori (manifold e supporti)

FN SpA

Le attività affidate a FN Spa sono relative alla sola linea progettuale LP3 "Reattori di IV generazione" per la quale i risultati raggiunti sono descritte di seguito. Si fa notare che le attività FN inizialmente previste in LP1 sono poi state assimilate in LP3 al fine di una migliore gestione e ottimizzazione delle attività.

B.3 Prove di fabbricabilità per sviluppo elemento di combustibile LFR [Report RdS/2012/048]

Nell'ambito delle attività di progettazione di elementi di combustibile innovativi per sistemi LFR si è reso necessario associare alle attività progettuali anche studi approfonditi di fabbricabilità delle soluzioni proposte.

A tale scopo ENEA ha elaborato una specifica tecnica relativa allo studio di fattibilità di alcuni dettagli di elementi di combustibile secondo due distinti progetti concettuali. Il primo è un fascio di barrette con guaina con una disposizione su reticolo quadrato mantenuto da griglie spaziatrici senza il supporto strutturale di una scatola esterna. Questa opzione prevede barrette "vented" ovvero liberate dalla presenza di "gas di fissione" interno. La connessione particolare delle singole barrette alla griglia di piede necessita una verifica preliminare della sua fattibilità con capacità di tenuta.

Il secondo studio verte sul concetto di elemento di combustibile a sezione esagonale con scatola e griglie spaziatrici previsto attualmente nel progetto dimostrativo di reattore a piombo ALFRED. In particolare lo studio prende in esame il concetto di realizzazione delle griglie spaziatrici e la fattibilità del montaggio di insieme delle barrette del fascio all'interno della scatola.

Partendo dalle specifiche ENEA relative al core ALFRED ed alle geometrie suggerite per le griglie spaziatrici, FN Spa ha individuato la migliore sequenza per la composizione del fascio e per il suo inserimento nel tubo di contenimento esagonale.

Relativamente all'impiego di elementi di combustibile quadrati "vented" FN ha sviluppato lo studio del collegamento tra guaina del combustibile e collettore di raccolta dei gas di fissione, seguendo tre modalità diverse, saldatura, tipo ad "imbutitura" (con punta a frizione), e filettatura con guarnizione.

FN ha effettuato uno studio preliminare che ha portato alla definizione delle tre tipologie di accoppiamento. Per ciascuna tipologia individuata sono stati progettati i provini preliminari e quelli definitivi (stringa da quattro elementi).

I campioni sono stati poi testati mediante prove in elio secondo il metodo Hood e saranno successivamente realizzati test di tenuta dopo ciclaggio termico. Sui provini singoli, già testati ad elio, verrà effettuata la caratterizzazione meccanica e strutturale.

Confrontando i risultati preliminari ottenuti, risulta comunque che la microsaldatura laser dà valori più bassi come segnale di perdita e sembra essere la strada migliore anche in termini di ripetibilità e controllo "passivo" della qualità della lavorazione.

Università di Roma "Tor Vergata", Dipartimento di Ingegneria Industriale

Le attività affidate all'Università di Roma Tor Vergata sono relative alla sola linea progettuale LP3 "Reattori di IV generazione"

B.2 Sviluppo coating in FeAl e TiN [Report RdS/2012/047]

Nell'ambito di questo obiettivo si è realizzata una intensa attività di ricerca e sviluppo, su scala laboratorio, avente come obiettivo la identificazione di nuove tipologie di coating che possano meglio rispondere alle esigenze tipiche dei sistemi nucleari refrigerati a piombo.

In particolare, l'Università di Roma "Tor Vergata", ha provveduto alla caratterizzazione microstrutturale, morfologica e meccanica di rivestimenti di TiN, FeAl (Fe (67wt%)Al(33wt%) e FeCrAl (FeCr(18-20wt%)Al(8-10wt%)), depositati su quattro diversi tipi di substrati, due ferritici (i.e. P91 e 441) e due austenitici (i.e. 304 e 316). Tali rivestimenti sono stati oggetto di un'ampia e completa campagna sperimentale principalmente volta a investigare la natura dei rivestimenti prodotti, la loro morfologia, microstruttura e adesione al substrato. Sono state, inoltre, studiate dal punto di vista termico e microstrutturale le sorgenti FeAl e FeCrAl utilizzate per le deposizioni mediante tecnica PVD, al fine di dimostrarne e confermarne la composizione e purezza. Sulla base dei risultati collezionati, è stato possibile concludere che:

- la deposizione di rivestimenti TiN è confermata sia da misure XRD sia da microanalisi EDS.
- i film monofasici di FeAl e FeCrAl depositati sui quattro substrati presentano, in tutti i casi, film rugosi e ricchi di droplets. L'utilizzo di una bassa temperatura di deposizione potrebbe avere comportato una formazione di aggregati di macrogocce invece che di una crescita di un film continuo e omogeneo.

L'analisi dei risultati ottenuti e di dati di Letteratura suggeriscono quindi di focalizzare l'attività sperimentale futura principalmente sull'ottimizzazione delle condizioni di deposizione al fine di ottenere rivestimenti più omogenei e di incrementarne l'adesione al substrato.

Università dell' Aquila, Centro di Eccellenza DEWS

Le attività affidate all'Università dell'Aquila sono relative alla sola linea progettuale LP1 "Collaborazioni internazionali"

B.2 Accordo con CEA: Prosecuzione della collaborazione nel campo della progettazione impiantistica nuclear [Report RdS/2012/160 e RdS/2012/161]

Nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo dedicate alla progettazione di infrastrutture sperimentali, ENEA e l'Università dell'Aquila hanno collaborato sulla progettazione di strumentazione e sistema di controllo di nuovi sistemi avanzati da impiegare nelle facilities sperimentali in corso di completamento.

Università di Pavia, Laboratorio Energia Nucleare Applicata (LENA)

Le attività affidate all'Università di Pavia sono relative alla linea progettuale LP1 "Collaborazioni internazionali".

C.4 Infrastrutture nucleari per la ricerca [Report RdS/2012/167]

Nell'ambito degli studi relativi all'evoluzione del combustibile nucleare, si è implementata in collaborazione con UNIPV, un'attività di ricerca che ha avuto come obiettivo lo sviluppo e la validazione, mediante codici di calcolo e misure dirette, di metodologie il più possibile flessibili dal punto di vista della composizione del combustibile nucleare e della geometria del nocciolo del reattore. E' stata quindi sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCNP ver. 4C e MCB) e misure dirette, per lo studio del burn-up del combustibile nucleare del reattore TRIGA Mark II. La metodologia è stata validata confrontando i valori calcolati di burn-up del combustibile nucleare con i valori ricavati dai dati e dai parametri di esercizio dell'impianto.

D.2 Dati nucleari per la chiusura ciclo del combustibile (NEA, CERN) [Report RdS/2012/169]

Relativamente alla chiusura del ciclo del combustibile, ENEA e UNIPV hanno collaborato sulla riprogettazione dell'esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di ^{241}Am nel reattore TAPIRO.

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente

Le attività affidate a all'Università Politecnica delle Marche sono relative alla linea progettuale LP1 "Collaborazioni internazionali".

C.1 Iniziative EURATOM: SNETP, ESNII, EERA [RdS/2012/163]

ENEA e l'Università politecnica delle Marche hanno collaborato nell'ambito delle prove sperimentali di diffusione neutronica ai piccoli angoli e diffrazione neutronica eseguite presso il Reattore ad Alto Flusso (ILL) di Grenoble su materiali di interesse per il nucleare da fissione.

Nell'ambito della collaborazione si è inoltre provveduto alla messa a punto di codici di calcolo necessari ad una affidabile interpretazione delle misure SANS condotte su materiali strutturali e, attraverso il programma FULLPROF, si sono analizzate alcune misure di diffrazione neutronica su materiale nucleari di interesse tecnologico.

Fusione nucleare: Attività di fisica della fusione complementari a ITER

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata da tutti i paesi più industrializzati una 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 di grande prestigio, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO). ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto consentirà di verificare le tecnologie rilevanti per il reattore e fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO.

A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato 'Broader Appproach' (BA) destinato ad accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione. Il costo dell'accordo è ripartito in pari uguali fra EU e Giappone (JAEA). L'accordo è regolato da specifici 'Agreement of Collaboration' con l'agenzia Europea Fusion for Energy che impegnano i vari paesi a fornire il proprio contributo.

L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, include una serie di azioni 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 JT60SA: 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 dpa/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 dell'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.

Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi finanziari per forniture 'in kind'. L'offerta è stata fatta in considerazione del valore industriale e strategico di questo programma.

Nell'annualità 2011 nel progetto sono state incluse attività svolte nel quadro del Progetto FAST (Fusion Advanced Study Torus) finalizzate alla realizzazione di un impianto di fusione di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER. FAST che dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER, ha lo scopo di studiare e controllare i meccanismi di smaltimento della potenza termica del plasma, che è il problema più critico da risolvere in un reattore a fusione. Per fare questo è previsto che in FAST vengano studiate configurazioni magnetiche avanzate e caratterizzati i materiali candidati all'utilizzo nel reattore.

Il proposto esperimento FAST è stato ideato in modo tale da essere integrato al progetto di JT60SA e con obiettivi complementari. Di conseguenza, l'integrazione degli esperimenti sulle due macchine potrà garantire lo studio completo dei problemi di fisica ancora aperti in vista di DEMO.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, ad ENEA sono state affidate le attività descritte nel seguito. Il progetto complessivo ha una durata di sei anni.

A. Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

Realizzazione, in collaborazione col CEA francese, del magnete superconduttore di JT60SA, incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

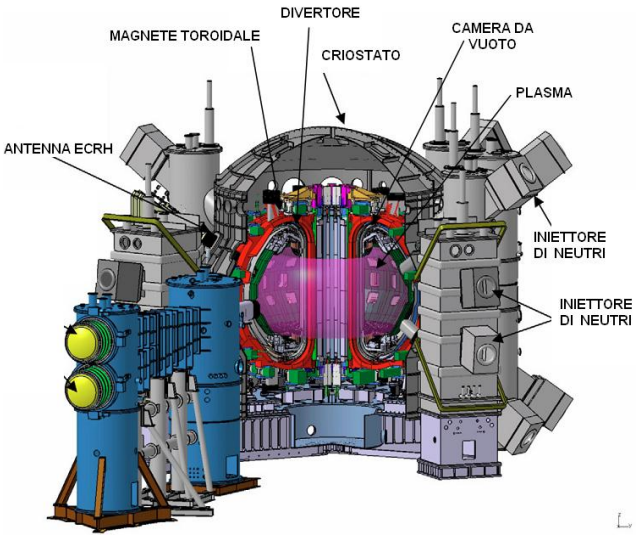


Figura 80. Vista assonometrica della Macchina Tokamak JT-60SA

JT60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m (Figura 80), in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, in configurazioni elongate a D, con singolo o doppio nullo ed impulsi di 100 s ogni ora. JT-60SA sarà dotato di un sistema di manipolazione remota per consentire la manutenzione di componenti all'interno della camera da vuoto investiti da un flusso neutronico di $1.5x10^{21}$ neutroni/anno. L'accoppiamento con il plasma di 41 MW di potenza di riscaldamento con iniettori di neutri ed antenne a microonde alla ciclotronica elettronica permette di operare con alte densità di plasma e significativi valori di flusso di potenza sul divertore. L'isolamento termico di JT-60SA sarà assicurato, sotto vuoto, da un criostato metallico.

Il superconduttore rettangolare in NbTi contenuto in una camicia in AISI è stato ottimizzato per ridurre i rischi di transizione rapida (quench) e migliorare la stabilità intrinseca. Ciascun superconduttore è attraversato da una corrente di 25,7 kA e refrigerato da una portata in massa di elio di 4 g/s.

L'analisi termoidraulica della bobina, considerando anche il riscaldamento nucleare, assicura condizioni operative fortemente stabili con un margine di temperatura di 1,2 gradi Kelvin.

Il Tokamak superconduttore JT-60SA sarà installato a Naka in Giappone nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U. Per la realizzazione della macchina JT-60SA l'ENEA è responsabile di:

- nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete; le altre nove saranno realizzate dal CEA Francese;
- le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico dotate di precisioni molto accurate per garantire il posizionamento finale delle bobine;
- le alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente, quattro sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) con inserzione di un sistema variabile di resistenza e quattro trasformatori.

Il sistema magnetico di JT-60SA, è costituito di tre sotto sistemi: i 18 magneti superconduttori (Figura 81) (NbTi) di campo toroidale (TF) che opereranno prevalentemente in regime stazionario; i 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale (CS) in Nb_3Sn necessario per indurre la corrente nel plasma; infine i 6 magneti di forma toroidale in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma (EF).

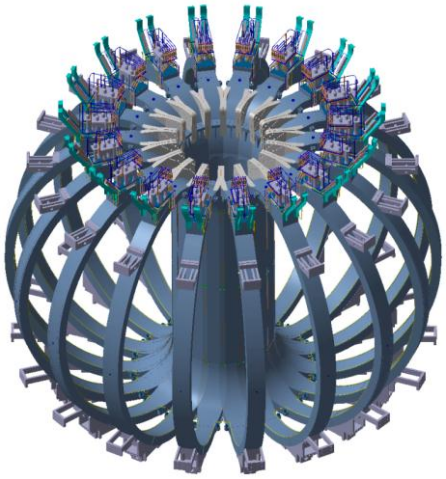


Figura 81. Sistema magnetico toroidale del Tokamak JT-60SA

Il cavo superconduttore è costituito da una treccia di 162 fili di rame per garantire il trasporto di corrente in caso di transizione dei fili superconduttori e da 324 fili di una lega NbTi immersi in una matrice di rame. Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio. Ogni pancake è formato da sei spire, con un isolamento di spira dello spessore di 1 mm. Ciascun doppio pancake (DP) è avvolto da isolante con uno spessore di 1 mm; mentre l'intero avvolgimento ha un isolamento verso massa di 3 mm. L'isolamento elettrico è realizzato con tele di vetro e resina epossidica impregnata sotto vuoto. L'intero pacco di avvolgimento della bobina ha dimensioni nominali di 345 mm (toroidalmente) e 150 mm (radialmente).

La realizzazione delle 9 bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale.

Alcuni processi speciali richiedono lo sviluppo di un programma di qualifica prima di essere adottati nelle procedure costruttive delle bobine. In accordo a quanto previsto nel piano di controllo di qualità il programma di qualifica è stato terminato nell'ambito dell'annualità 2011 ed ha riguardato le seguenti prove:

- impregnazione di un tratto lineare lungo un metro di bobina per simulare parte della gamba dritta della bobina, con sezione a piena scala;
- resistenza alla sollecitazione di taglio dell'isolante dopo impregnazione;
- saldatura del bocchello a piena scala dell'ingresso di elio di raffreddamento sul conduttore della bobina, completo dell'isolamento elettrico impregnato;
- realizzazione di un prototipo a piena scala del giunto elettrico interno per il collegamento in serie dei doppi pancake
- prove di saldatura su lamiere di differenti spessori (20, 50 mm) in AISI 316 L per la messa a punto dei parametri di saldatura e le geometrie richieste.

E' stata completata la realizzazione dei sottosistemi della linea di avvolgimento per la composizione finale dei DP della bobina.

Il conduttore in uscita dall'aspo svolgitore viene raddrizzato nelle due direzioni, in modo da ottenere una buona rettilineità necessaria per la fase di avvolgimento (tratti dritti). La raddrizzatrice ha una serie di rulli disposti su entrambe le direzioni, sincronizzati con la velocità di funzionamento della linea. Una volta raddrizzato e pulito il conduttore deve essere curvato per creare le spire che compongono i due strati del doppio pancake. Il conduttore, in entrata ed in uscita dall'unità piegatrice, deve essere ben guidato per mezzo di rulli. Questi rulli di contenimento dovranno essere motorizzati, integrati con la piegatrice, e costituire un alimentatore per il conduttore e per tutta la linea (Figura 82).

Figura 82. Unità raddizzatrice e piegatrice della linea di avvolgimento

Il metodo di avvolgimento richiede la preparazione della scorta per l'esecuzione del secondo strato del DP. La preparazione della scorta è realizzata con una linea dedicata composta da un aspo svolgitore porta rocchetto di trasporto, un impianto di pulizia e un aspo avvolgitore porta rocchetti di avvolgimento di primo e secondo strato.

Le fasi costruttive delle bobine richiedono delle attrezzature per la loro composizione e manipolazione. Le attrezzature realizzate sono state sottoposte a verifiche geometriche e funzionali.

Il processo costruttivo delle bobine di JT-60SA richiede la realizzazione di grandi impianti di elevate prestazioni funzionali. Sono state realizzate e in fase di commissioning:

Figura 83. Camera da vuoto per le prove finali della bobina toroidale

- camera da vuoto e sistema di pompaggio per le prove di accettazione del conduttore (prove di flussaggio con azoto, prova di pressione e di fuga);
- camera da vuoto per le prove di accettazione intermedie dei DP e finali della bobina toroidale (Figura 83). Il sistema è dotato di pompa turbo-molecolare per prove di flussaggio e di fuga;
- stampo di impregnazione per la bobina toroidale dotato di piatti e staffe di compattazione e sistema di riscaldamento per la cottura della resina.

Infine sono stati acquisiti tutti i materiali e componenti

necessari per la realizzazione della bobina.

L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per garantire il corretto accoppiamento con la bobina stessa.

Le alimentazioni elettriche degli avvolgimenti devono fornire una corrente continua regolabile in grado di riprodurre gli scenari di corrente desiderati. Questi sistemi dovranno essere inseriti ed utilizzare parte degli impianti esistenti utilizzati per l'alimentazione del precedente Tokamak JT-60U.

In particolare i 4 sistemi di interruzione della corrente continua (Switching Network Units, SNU) generano impulsi di alta tensione sugli avvolgimenti delle bobine del trasformatore centrale della macchina JT60-SA per produrre una brusca derivata di corrente capace di indurre la necessaria tensione toroidale nel plasma.

B. Progettazione e qualifica ingegneristica del target ifmif (international fusion materials irradiation facility)

La comunità scientifica, è impegnata a individuare e provare i materiali strutturali più adatti a rispondere alle differenti richieste di un prototipo dimostrativo di reattore a fusione. I materiali candidati all'impiego in un tal tipo di reattori devono poter resistere ad alte temperature con tassi di irraggiamento di 50 dpa all'anno.

La conduzione di ricerche appropriate in questa area di sviluppo, che appare fortemente strategica per tutto il settore industriale, richiede la realizzazione e l'impiego della sorgente di alti flussi neutronici con uno spettro energetico da Fusione. Per tale motivo nell'ambito delle attività tecnologiche di Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una sorgente di neutroni da 14 MeV detta IFMIF, un circuito per purificazione e pompaggio litio a 20 m/s e tre dispositivi per prove meccaniche sui materiali candidati all'impiego fusionistico. L'impianto IFMIF è finalizzato a testare i materiali candidati all'impiego in reattori a Fusione, consentendo la realizzazione di un database delle proprietà termofisiche di materiali irraggiati da impiegare per il progetto, la costruzione, il licensing e le operazioni in sicurezza del reattore a fusione dimostrativo DEMO.

IFMIF è costituito da due acceleratori lineari continui da 40 MeV per depositare due fasci da 125 mA di deutoni su un target costituito da una corrente di litio liquido. Tali deutoni, danno luogo all'emissione di un intenso flusso neutronico dell'ordine di 10^{18} $nm^{-2}s^{-1}$, con uno spettro energetico con un picco di 14 MeV tipico di un reattore a fusione.

Uno dei contributi di ENEA al progetto IFMIF è la fornitura di un sistema di rilevazione e misura in linea delle impurità del litio e di eventuali fenomeni di cavitazione presenti nell'impianto di prova EVEDA (Engineering validation and Engineering Design Activities) Lithium Test Loop; costruito nel centro di ricerca JAEA (Japan Atomic Energy Agency) di Oarai.

Sono stati introdotti numerosi miglioramenti sia nell'hardware che nel software sia del sistema di analisi dell'impurità del litio che nel sistema di rilevazione dei fenomeni di cavitazione.

Nella prospettiva di futuri upgrade, si è inoltre intrapresa un'opera di rinnovamento dei sistemi elettronici impiegati nel sistema di monitoraggio:

- è in corso di deposito un nuovo brevetto CASBA 2012 e si è già iniziata la progettazione di dettaglio di un prototipo di analizzatore di fenomeni di cavitazione completamente digitale che prenderà il posto del CASBA 2000
- si sono studiati metodi per il miglioramento della precisione del sistema di misura delle impurità presenti nel litio attraverso l'utilizzo di sistemi più accurati per la misura della resistenza e della temperatura della cella di misura.

La progettazione dell'impianto IFMIF richiede una approfondita conoscenza del comportamento dei materiali strutturali esposti al litio ad alta velocità. Per IFMIF è richiesto che il fenomeno di erosione/corrosione da litio venga limitato ad un valore non superiore ad 1 μm. L'indagine sperimentale per la determinazione di tale tasso di erosione corrosione sarà fatta presso l'impianto LIFus 6 del CR ENEA Brasimone. La sezione di prova è stata profondamente modificata rispetto al precedente layout al fine di migliorarne le prestazioni idrauliche nel rispetto dei parametri di prova. Nell'attuale configurazione vengono ospitati 8 provini, dell'altezza di 8 mm e diametro di 20 mm, con un foro centrale di 8 mm. La presenza di un sistema di centraggio inferiore e superiore evita l'insorgere di vibrazioni per l'elevata velocità del fluido. L'ancoraggio superiore, realizzato mediante una piastra rimovibile, consente una facile estrazione mediante un dispositivo di tipo meccanico. La parte superiore della sezione di prova, per una altezza di circa 300 mm, è riempita di argon, per ridurre al minimo le possibilità di contaminazione del litio.

La purificazione del litio dagli elementi non metallici (C, O, H, N) in esso disciolti è ottenuta da una trappola fredda, un misuratore di resistività e una trappola calda: i primi due sono parte di un circuito secondario appositamente dedicato alla purificazione, mentre il terzo è inserito direttamente nel circuito principale di Lifus 6, venendo a coincidere col serbatoio di stoccaggio del Litio, dal quale il circuito viene riempito/svuotato. La purificazione del litio all'interno di Lifus 6 viene quindi effettuata in maniera continua (su Litio circolante nell'impianto) per quanto concerne la trappola fredda, mentre viene effettuata ad intervalli di tempi discreti, in maniera statica, per quanto riguarda la trappola calda.

Il monitoraggio della concentrazione di azoto è affidato al misuratore di resistività. Questo dispositivo, sviluppato all'Università di Nottingham in collaborazione con il centro ENEA del Brasimone, si basa sulla variazione della resistività del metallo prodotta dagli anioni in esso solubilizzati. E' stata effettuata la calibrazione di questo dispositivo, determinando la relazione lineare, valida per un ampio range di concentrazioni, che collega, ad ogni temperatura, la resistività alla concentrazione di Azoto.

Infine, l'ENEA in qualità di responsabile della progettazione del sistema target a litio liquido (Target Assembly) basata sul concetto di backplate rimovibile a baionetta, nella presente annualità si è principalmente concentrata sui due seguenti aspetti:

- integrazione del target assembly con backplate a baionetta con la sua struttura di contenimento (Target Test Cell) progettata dal KIT (Europa) e col circuito a litio (lithium loop) progettato dal JAEA (Giappone);
- avanzamento e miglioramento del modello di target assembly esistente, a partire dalla configurazione sviluppata nell'ambito della precedente annualità dell'Accordo di Programma (2010).

C. Attività per IFERC (INTERNATIONAL FUSION ENERGY RESEARCH CENTER)

Nella ricerca sulla fusione, particolare rilevanza assume lo sviluppo dei materiali e nello specifico dei composti ceramici. Ai compositi ceramici si guarda infatti con grande interesse per l'utilizzo sia come materiale strutturale sia come materiale funzionale per barriere termiche ed elettriche. Lo studio di compositi di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo del programma DEMO.

L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche dei compositi in SiC/SiC ed ha sviluppato un modello multiscala applicato ai materiali compositi ceramici con la messa a punto di tecnologie costruttive per la realizzazione di compositi ceramici con matrice e fibra in carburo di silicio attraverso la tecnologia CVI (Chemical Vapor Infiltration). Nel campo dei compositi ceramici, grazie anche alla collaborazione in atto con la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, si sono utilizzate dotazioni impiantistiche di grande rilievo come il sistema di CVI per la realizzazione di componenti di carburo di silicio composito (SiC/SiC) sviluppando processi speciali per la realizzazione di manufatti di varie geometrie.

Nell'ambito delle attività di caratterizzazione di materiali ceramici ai fenomeni di erosione si è realizzato un apparato per prove ad alta temperatura (1000 °C) di un target rotante di SiC/SiC nel metallo liquido di litio piombo. Le azioni previste riguardano la progettazione e realizzazione del forno ad alta temperatura e la definizione di tutti gli impianti accessori necessari per l'esecuzione delle prove, ad alta temperatura e per tempi di 3000 ore, su campioni di carburo di silicio rotanti nel metallo fuso litio piombo.

D. Altre attività internazionali di accompagnamento ad ITER: FAST il nuovo esperimento satellite europeo

Obiettivo è la realizzazione di un esperimento di fusione denominato FAST (Figura 84) di prestazioni intermedie tra quelle di JET (la macchina tokamak europea in funzione dal 1983 a Culham, Inghilterra) e quelle di ITER. FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. Lo scopo è quello di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle alfa mediante iono accelerati da sistemi di riscaldamento ausiliario. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico, sviluppate in ENEA, e le scariche di lunga durata consentono di provare componenti in condizioni rilevanti per il funzionamento di ITER e DEMO.

Sulla base di un disegno concettuale della macchina, è stato finalizzato il progetto strutturale del nucleo centrale del Tokamak FAST e di un suo componente fondamentale per lo smaltimento dell'energia termica del plasma: il divertore. Per questo studio sono stati sviluppati opportuni modelli elettromagnetici e strutturali agli elementi finiti in 3D, adottando opportune proprietà omogeneizzate per i materiali quando necessario. Nel calcolo delle forze applicate sono stati presi in considerazione i maggiori carichi elettromagnetici ipotizzabili a seguito di eventi anomali, quali lo spostamento verticale dell'anello di plasma seguito da disruzione rapida. Sono state analizzate in particolare, dal punto di vista strutturale, le bobine del trasformatore centrale e la camera per il plasma.

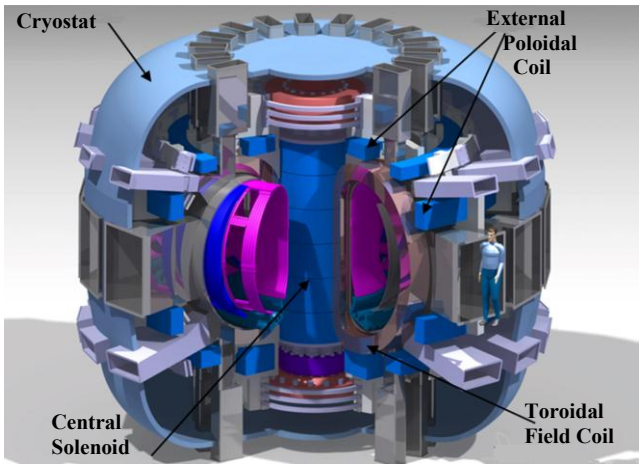


Figura 84. Vista assonometrica di FAST

L'alto flusso neutronico richiede l'utilizzo del sistema di RH in particolare per il divertore. Sono state apportate opportune modifiche al disegno concettuale, necessarie per realizzare un efficace sistema di RH e per garantire l'integrità strutturale della macchina nelle diversi condizioni operative. Inizialmente è stata considerata la possibilità di usare una soluzione analoga a quella già ampiamente studiata e proposta per ITER. Attraverso una serie iterativa di revisione del design, fatta in collaborazione con il gruppo finlandese (VTT) che sta attualmente sviluppando il sistema per ITER, ha permesso lo sviluppo di una nuova soluzione, ivi incluso un sistema di supporto molto flessibile, per permettere l'uso di diverse geometrie di divertore.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Macchina JT-60SA

A.1 Acquisizione dei materiali costituenti la bobina, qualifica dei processi speciali con lo sviluppo di mock-up e di prototipi a piena scala, realizzazione di 2 doppi pancake dell'avvolgimento della bobina completi di collaudo finale

A seguito della stipula del contratto tra ENEA e ASG Superconductors (Genova) per la realizzazione delle 9 bobine di campo toroidali, sono state avviate le azioni preparatorie alla loro costruzione. In particolare sono state eseguite le seguenti attività:

- emissione specifiche tecniche e procedure costruttive, disegni costruttivi d'officina, emissione procedure di prova e corrispondente supervisione;
- acquisizione dei materiali necessari alle varie fasi costruttive della bobina come nel seguito indicato:
  - nastri per l'isolamento elettrico dei conduttori della bobina; segmenti di riempitivo G10 per il salto di strato e la zona delle terminazioni elettriche; resina per impregnazione della bobina e della bobina nella cassa;
  - lega brasante, prodotti chimici, materiale e lavorazione meccanica per la realizzazione delle giunzioni elettriche intermedie e di estremità di ciascuna bobina; materiale d'apporto per la saldatura finale della cassa di contenimento della bobina;
  - realizzazione del sistema di tubazioni dell'impianto fluidico completo di supporto meccanico per l'ingresso e l'uscita di elio di refrigerazione dalla bobina; tratti di tubo dotato di isolatori elettrici;
  - strumentazione varia fra cui cavi per presa tensione, sensori di temperatura con accessori completa di cablaggi sulla cassa della bobina; materiale di consumo per lavorazioni meccaniche (bombole Argon, Elio e Azoto, detersivo per lavaggio cavo);
- qualifica dei processi speciali realizzativi con lo sviluppo di mock-up e di prototipi a piena scala, quali:
  - impregnazione di un tratto lineare di bobina e misura elettrica dell'isolamento;
  - resistenza alla sollecitazione di taglio dell'isolante dopo impregnazione;
  - doppio pancake prototipo con conduttore in superconduttore;
  - giunzioni elettriche realizzate con superconduttore e provate a temperatura criogenica;
  - boccaglio di ingresso di elio. La qualifica della saldatura richiede anche il controllo della temperatura dei fili del superconduttore per evitarne il danneggiamento;
  - saldatura di giunzione fra i sottoinsiemi della cassa e del coperchio della cassa.

Durante l'espletamento di tali operazioni, sono state svolte le seguenti attività:

- definizione della disposizione di attrezzature ed impianti costruttivi;
- predisposizione delle zone di lavoro confinando con particolare cura le aree in cui la pulizia deve essere garantita per assicurare l'assenza di materiali contaminanti, definizione delle procedure di ingresso del personale e di protezione dei componenti;

- prove di accettazione del conduttore superconduttore in NbTi;
- emissione specifiche tecniche e procedure costruttive; disegni costruttivi d'officina; emissione procedure di prova e corrispondente supervisione.

I materiali necessari alla realizzazione delle 9 bobine sono stati ordinati presso gli stabilimenti della ASG.

PROGRAMMA DI QUALIFICA

- *Processo di impregnazione*

La qualifica e validazione del processo di impregnazione è stata eseguita realizzando un tratto lineare di bobina lungo un metro, con sezione a piena scala. Le operazioni sono state eseguite e monitorate con un piano di controllo dedicato. Le fasi costruttive sono state monitorate; lo stampo di impregnazione è stato sottoposto a prove di pressione e da vuoto e nella fase di impregnazione sono stati registrati i parametri di temperatura, pressione e tempo.

I risultati delle prove elettriche (Figura 85) sono i seguenti:

- tensione di isolamento interspira a V=75 (R=79 G Ω), 100 (R=102 G Ω) , 150 V (R=155 G Ω). Una prova addizionale ha raggiunto una tensione di isolamento di 10 kV senza scarica elettrica. La prova ha avuto esito positivo considerando che le specifiche richiedono una capacità di isolamento di 80 V.
- tensione di isolamento verso massa; con V=3,8 kV DC / 1 min la corrente di fuga non è misurabile dallo strumento (I <1μA). Una prova addizionale, dopo l'applicazione della vernice conduttiva, ha raggiunto una tensione di isolamento di 15 kV senza scarica elettrica. La prova ha avuto esito positivo considerando che le specifiche richiedono una capacità di isolamento di 3,8 kV.

Figura 85. Esecuzione delle prove elettriche

- *Resistenza alla sollecitazione di taglio dell'isolante*

Le prestazioni dell'isolamento realizzato da nastro di vetro impregnato sotto vuoto con resina epossidica è uno degli aspetti più rilevanti per l'integrità funzionale della bobina. Quindi la valutazione delle sue caratteristiche in ordine alla resistenza della sollecitazione di taglio statica e con carico ciclico è di fondamentale importanza. Per questo, si richiedono i requisiti minimi:

- resistenza alla sollecitazione di taglio statica dopo impregnazione di 55 MPa a 4 K, corrispondente a 40 MPa a 300 K;
- resistenza alla sollecitazione dinamica di 36000 cicli di 20 MPa a 300 K;
- Le proprietà meccaniche non devono degradare dopo 20 kGy.

ASG ed ENEA hanno adottato un campione standard costituito da due piatti metallic separate da 2 mm di fibra di vetro impregnata con resina epossidica per simulare l'isolamento fra spire.

Le prove (Figura 86) hanno ottenuto i seguenti risultati:

- sollecitazione di taglio statica a R.T.: 57, 56, 54 in MPa;
- sollecitazione di taglio statica a 4 K: 62, 65, 63 in MPa;
- sollecitazione con 36000 cicli a 20 MPa: esito positivo.

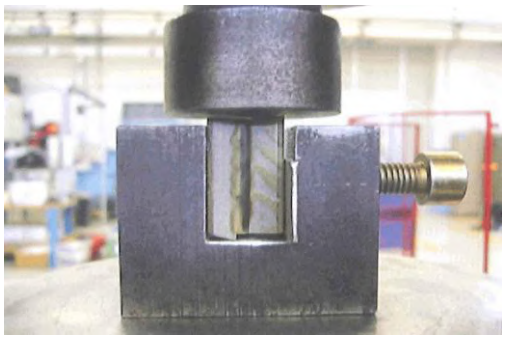


Figura 86. Campione di prova al taglio nell'apparato di carico

- *Saldatura dell'ingresso di elio*

Il bocchello di ingresso di elio è realizzato in acciaio saldato sulla camicia del conduttore ed è progettato per minimizzare le perdite di carico . Il bocchello alimenta il DP con elio di raffreddamento ad una temperature di 4 K. La bobina è soggetta a sforzi elettromagnetici di tipo ciclico ed obbliga ad eseguire prove di qualifica per la definizione delle procedure di saldatura. Le operazioni sono state eseguite con l'ispezione come terza parte dell'Istituto Italiano di Saldatura.

Per validare il procedimento di saldatura sono stati eseguite le seguenti prove (Figura 87):

- n°3 shock termici per immersion in azoto liquido;
- esame visivo, liquidi penetranti e raggi X come test distruttivo;
- prova di pressione a 25 bar/1h e fuga con elio con $4*10^{-10}$ mbar l/s (si richiede $4*10^{-10}$ mbar l/s) .
- isolamento contromassa dell'ingesso di elio elettricamente isolato pari a:
  R = 780 GΩ a V=3,8 kV/1min; R=700 GΩ a V=5,0 kV/1min.
  richiesto V=3,8 kV con R = 100 MΩ.

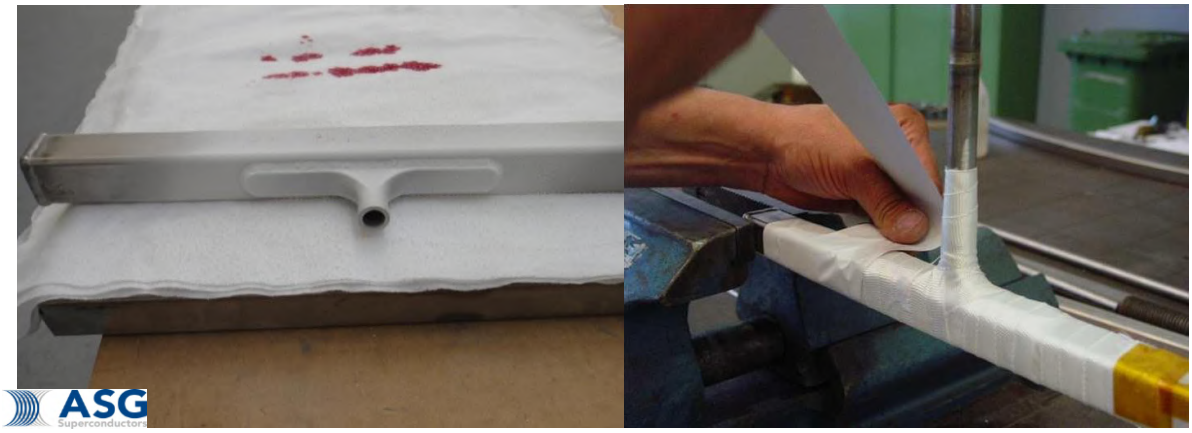


Figura 87. Ingresso di elio sottoposto ai liquidi penetranti e isolato elettricamente

- *Giunto elettrico intermedio*

Per la qualifica del processo di realizzazione e la verifica del rispetto delle richieste elettriche ed idrauliche si è realizzato un giunto elettrico interno a piena scala (Figura 88). Il campione sarà testato nel laboratorio di superconduttività dell'ENEA con correnti fino a 20 kA in bagno di elio liquido.

Figura 88. Realizzazione di un giunto elettrico interno a piena scala

- *Saldatura di chiusura della bobina*

Dopo l'inserimento dell'avvolgimento della bobina nella cassa la bobina verrà chiusa per saldatura. Sono state eseguite prove di saldatura su lamiere di differenti spessori (20, 50 mm) in AISI 316 L per la messa a punto dei parametri di saldatura e per le geometrie richieste (Figura 89).

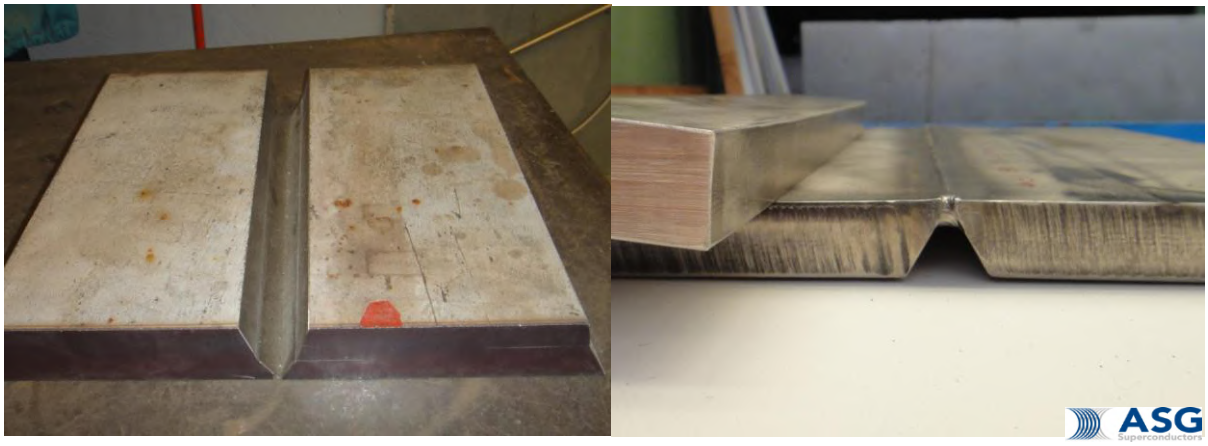


Figura 89. Prove di saldatura su lastre di spessore 50 e 20 mm

Le fasi costruttive delle bobine richiedono delle attrezzature per la loro composizione e manipolazione. Le attrezzature realizzate e verificate funzionalmente sono:

- attrezzatura per la manipolazione del cestello del conduttore;
- attrezzatura per la manipolazione del DP in grado di interfacciarsi con la linea di avvolgimento;
- banco di composizione del DP dotato di supporti regolabili per l'applicazione dell'avvolgimento contromassa;
- banco di composizione della bobina toroidale dotata di staffe laterali con regolazione fine per il corretto posizionamento finale di ciascun DP (Figura 90).

Figura 90. Banco di composizione della bobina toroidale

Il processo costruttivo delle bobine di JT-60SA richiede la realizzazione di grandi impianti di elevate prestazioni funzionali. Sono state realizzate e in fase di commissioning:

- camera da vuoto e sistema di pompaggio per le prove di accettazione del conduttore (prove di flussaggio con azoto, prova di pressione e di fuga);
- camera da vuoto per le prove di accettazione intermedie dei DP e finali della bobina toroidale. Il sistema è dotato di pompa turbo-molecolare per prove di flussaggio e di fuga;
- stampo di impregnazione per la bobina toroidale dotato di piatti e staffe di compattazione e sistema di riscaldamento per la cottura della resina (Figura 91).

Le attività dell'obiettivo sono dettagliate nel rapporto:

- RdS-2012-254 Advances in the manufacturing activities for the supply of 9 TF coils of JT-60SA Tokamak and associated validation program

Figura 91. Stampo di impregnazione della bobina toroidale

A.2 Progettazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato aggiudicato alla ditta Walter Tosto nel luglio 2012. ENEA ha successivamente consegnato alla ditta la documentazione tecnica contrattuale composta dalla specifica tecnica (Rev. 1), dalla specifica specifica manageriale e dai modelli 3D e disegni costruttivi. Tale documentazione è allegata al rapporto tecnico RdS/2012/255.

La ditta ha predisposto e trasmesso il quality plan (Rev.3) e lo schema di segmentazione casse, documenti necessari per poter autorizzarla ad acquistare il materiale per la realizzazione delle casse, le cui schede tecniche di acquisto sono state successivamente approvate in rev. 1.

E' stato effettuato l'ordine di acquisto di tutto il materiale per la costruzione dei componenti delle 18 casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60 SA e definiti i criteri di ispezione ed esecuzione delle prove di accettazione dei materiali.

Sono stati preparati i modelli 3D ed i disegni relativi alla realizzazione dei mock-up e, dopo aver definito la segmentazione della cassa di contenimento da realizzare, sono stati sviluppati i modelli 3D dei componenti delle casse.

La ditta ha predisposto le zone di lavoro meccanico e di saldatura confinando le aree in cui la pulizia deve essere garantita per assicurare la protezione dei componenti da materiali contaminanti e definito i metodi di saldature (EBW e TIG) e dei relativi cianfrini. Tali processi di saldatura utilizzeranno procedure e controlli già qualificati. La ditta ha inoltre trasmesso una serie di documenti relativi alla gestione della documentazione, documenti di controllo di qualità e procedure di lavorazione.

Tutti i documenti prodotti dalla Walter Tosto sono elencati nel rapporto tecnico RdS/2012/256 e conservati nell'archivio ENEA delle attività relative a JT-60SA.

In particolare sono state eseguite le seguenti attività:

- costruzione di mock-up (in fase di completamento) a piena scala per la validazione della tecnologia di saldatura di chiusura della bobina curata da due partner internazionali (Figura 92). Lo sviluppo del progetto, che coinvolge i due partner, ha portato ad un aggiornamento della configurazione geometrica dei mock-up ed alla modifica della geometria dei cianfrini per la saldatura di chiusura di qualifica. Come conseguenza sui mock-up che erano in corso di completamento, sono da eseguire operazioni costruttive aggiuntive.
- sviluppo dei modelli 3D dei componenti delle casse (Figura 93) e definizione delle attrezzature di lavorazione e di trasporto dal sito di fornitura alla Ditta per l'integrazione della cassa di contenimento con l'avvolgimento della bobina.
- predisposizione delle zone di lavoro meccanico e di saldatura.
- acquisizione completa dei materiali per la realizzazione dell'intera fornitura e definizione delle prove di accettazione con particolare riferimento alla analisi dei materiali ed alle sue proprietà meccaniche e magnetiche.

- le procedure di saldatura selezionate (EBW e TIG) sono già state qualificate e sono state preparate le specifiche sui controlli delle saldature e controlli intermedi e finali.

Figura 92. Fasi realizzative del mock-up

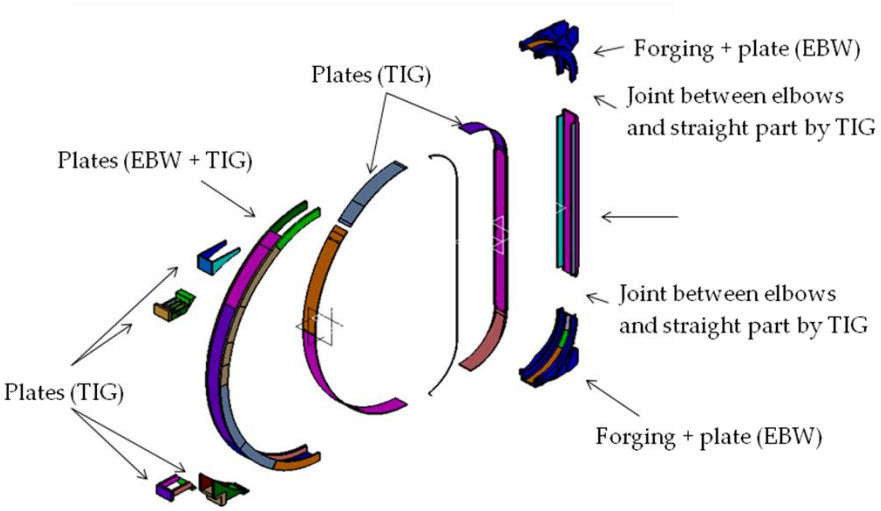


Figura 93. Segmentazione in 3D della cassa e metodi costruttivi

Le attività dell'obiettivo sono descritte nei dettagli nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/255 Documenti tecnici contrattuali per la realizzazione delle 18 casse di contenimento di JT-60SA
- RdS/2012/256 Stato delle attività contrattuali per la realizzazione delle 18 casse di contenimento di JT-60SA

A.3 Progettazione degli "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 interruttore per la corrente continua che inserisce molto rapidamente un resistore nel circuito di alimentazione allo scopo di produrre l'alta tensione necessaria al breakdown ed alla formazione del plasma. È utile rilevare che le prestazioni non comuni richieste agli SNU (in termini di corrente, tensione, tempi di intervento) non possono essere ottenute mediante dispositivi commerciali esistenti e richiedono quindi un progetto specifico basato su configurazioni innovative.

L'ENEA, anche con la collaborazione di F4E e JAEA, ha elaborato le specifiche tecniche (TS) e gli altri documenti necessari alla realizzazione degli SNU, alla integrazione dei sistemi e alla gestione dell'impianto.

Nel periodo ottobre 2011 - settembre 2012 sono state svolte le seguenti attività:

1. redazione delle TS definitive per la Call for Tender (approvate anche da F4E e JAEA);
2. redazione delle specifiche gestionali e di qualità (MQS) per la Call for Tender (approvate anche da F4E);
3. redazione ed aggiornamento della documentazione richiesta dagli accordi BA, PA e AoC (Procurement Plans, Procurement Schedules, Risk Tables, Periodic Reports, ecc.);
4. partecipazione agli incontri tecnici e gestionali con i partner internazionali (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie) per lo scambio di informazioni e l'aggiornamento del progetto;
5. preparazione dei documenti legali ed amministrativi necessari per lo svolgimento della Call for Tender.
6. selezione di un fornitore industriale per l'esecuzione finale degli SNU;
7. azioni relative al procedimento di gara e all'aggiudicazione della fornitura;
8. avvio delle attività tecniche con la ditta aggiudicataria.

Le prime attività hanno riguardato gli aggiornamenti alle specifiche tecniche per la Call for Tender degli SNU, con particolare riguardo a quelli definiti in questo ultimo anno di attività.

Sono stati codificati i test che il fornitore (IS) deve effettuare per la verifica ed il collaudo del prototipo di SNU e delle 3 SNU di serie. Inoltre, insieme ai partner internazionali, sono state definite le interfacce e le condizioni esterne degli SNU all'interno dell'impianto JAEA a Naka (Figura 94).

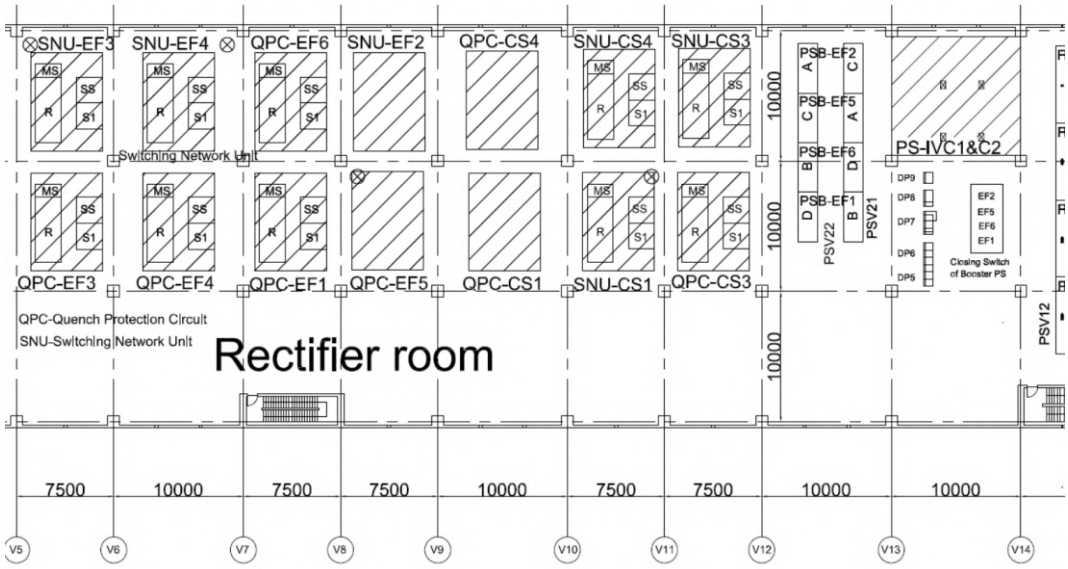


Figura 94. Layout degli SNU nelle aree dedicate

È importante sottolineare che, a causa della natura sperimentale ed innovativa del sistema, alcune sue caratteristiche, anche non secondarie, sono costantemente oggetto di discussione ed aggiornamento con gli altri membri del progetto JT-60SA.

Sono state sviluppate le specifiche gestionali e di qualità (Management and Quality Specifications for the ENEA Industrial Supplier, MQS) richieste per la fornitura. Tali specifiche sono state preparate dall'ENEA per l'IS e sono state approvate da F4E.

Il contratto è stato assegnato alla Energy Technology con cui l'ENEA ha iniziato lo sviluppo delle prime attività tecniche.

Le attività sono descritte nei dettagli nel rapporto:

- RdS/2012/257 Fornitura di 4 sistemi di commutazione Switching Network Unit per la macchina sperimentale tokamak JT-60SA

A.4 Progettazione alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA

L'ENEA si è impegnata a fornire una parte delle alimentazioni elettriche di JT-60SA. Un'altra parte rilevante delle alimentazioni sarà fornita dal CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) con cui è stato necessario concordare le specifiche tecniche e gestionali.

Gli alimentatori oggetto della fornitura richiedono un progetto tecnico specializzato e una gestione di insieme molto attenta:

- per l'elevatissima potenza in corrente continua con basso duty cycle;
- per le configurazioni proposte (back-to-back con corrente di circolazione);
- per la necessità di interagire con i sistemi di diversi partner internazionali (F4E, JAEA e CEA), sviluppati in parallelo;
- per la scelta (anche dettata dal desiderio di limitare i costi per i contribuenti) di riutilizzare, ove possibile;
- elementi della macchina JT-60 preesistente, di cui JT-60SA è un aggiornamento superconduttore (super, advanced).

Per questi motivi, anche durante il periodo coperto da questo rapporto l'ENEA ha dovuto svolgere diverse attività di aggiornamento delle specifiche tecniche e degli altri documenti necessari per la realizzazione, integrazione dei sistemi e gestione dell'impianto. A questo scopo, l'ENEA ha partecipato a diversi meeting e scambi di informazione con i partner nazionali ed internazionali, (in particolare F4E, CEA e JAEA). Poiché la realizzazione finale degli alimentatori sarà affidata da ENEA ad un fornitore industriale (Industrial Supplier, IS), in questo periodo sono stati selezionati gli interlocutori potenziali a cui rivolgere la Call for Tender finale che sarà lanciata nei prossimi mesi.
Gli alimentatori da fornire sono divisi in:

- 4 Solenoidi centrali (Central Solenoid, CS), classificati come CS1, CS2, CS3 e CS4;
- 4 Equilibrium Field (EF) coils, classificati come EF1 e EF6;
- 2 Fast Plasma Position Control (FPPC) coils (Figura 95), classificati come lower FPPC e upper FPPC.

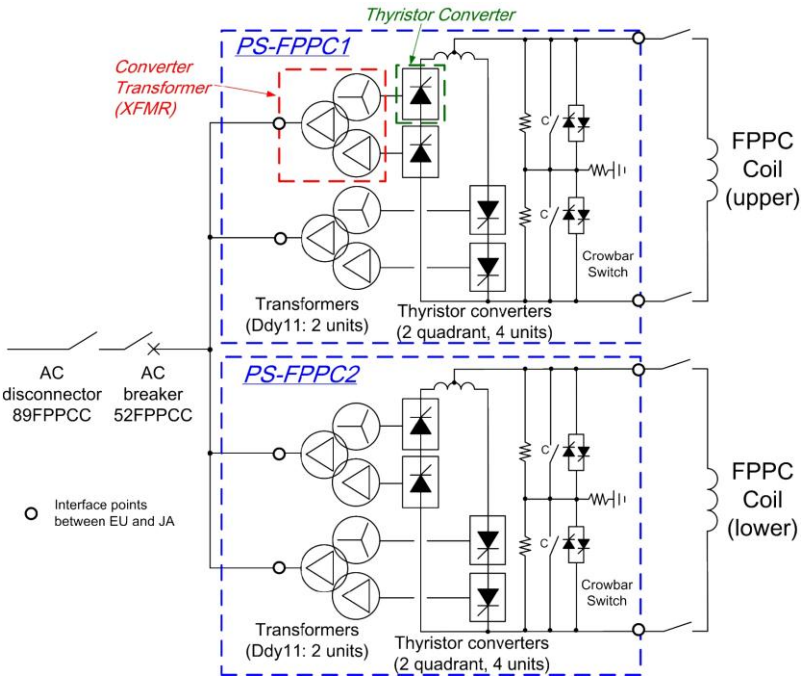


Figura 95. Schema delle PS FPPC

Sono state svolte le seguenti attività:

1. analisi e simulazione di alcuni aspetti del sistema ancora da definire o da aggiornare con le nuove informazioni disponibili, anche grazie agli avanzamenti nelle altre parti del sistema;
2. un passo fondamentale per il progetto degli alimentatori è stato il loro dimensionamento termico che ha richiesto un confronto con gli scenari di corrente previsti dai fisici giapponesi. A questo scopo, in collaborazione con F4E è stato sviluppato un tool informatico per il calcolo delle grandezze elettriche e termiche degli alimentatori (in particolare, per la stima delle temperature di giunzione dei tiristori nei diversi casi e configurazioni). Questo tool è stato impiegato anche per il progetto degli alimentatori forniti

dal CEA e sarà utile anche durante le operazioni di JT-60SA per valutare preventivamente la realizzabilità di uno scenario;

3. durante la stesura delle TS sono stati eseguiti calcoli finalizzati alla stima della temperatura di giunzione dei tiristori degli alimentatori oggetto della fornitura;
4. definizione, insieme ai partner internazionali, delle interfacce e delle condizioni esterne degli alimentatori all'interno dell'impianto JAEA a Naka;
5. redazione delle TS aggiornate per la Call for Tender. Tali TS sono state integrate con quelle del CEA e sono state discusse ed ufficialmente approvate da F4E e JAEA;
6. aggiornamento della documentazione richiesta dagli accordi di PA e AoC (documenti di qualità, Procurement Plans, Procurement Schedules, Risk Tables, Periodic Reports, ecc.) in collaborazione con F4E e JAEA;
7. partecipazione agli incontri tecnici e gestionali con i partner internazionali (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie) per lo scambio di informazioni e l'aggiornamento del progetto.

Le attività sono descritte nei dettagli nel rapporto:

- RdS/2012/258 Attività finalizzate alla fornitura di 8 alimentatori AC/DC per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina sperimentale tokamak JT-60SA

B. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)

B.1 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF

- *Misura delle impurità disciolte nel litio*

Le impurità disciolte nel litio, in particolare composti legati ad atomi/ioni di azoto (N) possono modificare in maniera sostanziale la durata di vita degli impianti. Infatti, gli acciai inossidabili utilizzati negli impianti a litio liquido, sono resistenti al litio ma non ai composti Li-N. E' quindi di fondamentale importanza stimare la presenza di tali composti disciolti al fine di attivare opportuni sistemi di abbattimento delle impurità Li-N previsti e già installati nell'impianto ELTL. La misura delle impurità avviene tramite la misura della resistenza elettrica del litio.

Su questo componente sono state introdotte le seguenti modifiche:

- il loop di misura della resistenza del litio è stato interamente ricostruito con materiali nuovi di caratteristiche note e attraverso procedure di costruzione certificate;
- tutti i cavi relativi al sistema di misura della resistenza sono stati riprogettati e forniti dalla ditta costruttrice del nano ohmmetro (BINT, Milano);
- il software di comunicazione del nano ohmmetro con il PC remoto attraverso il bridge RS232-Ethernet è stato rivisto, corretto e migliorato in diversi punti. In particolare sono state aggiunte una serie di funzioni che riportano automaticamente al sistema di misura una serie di informazioni aggiuntive sul settaggio dello strumento (fondo scala, corrente di misura, etc.);
- il sistema di alimentazione della pompa elettromagnetica è stato interamente rivisto. Adesso è possibile accendere / spegnere la pompa elettromagnetica da remoto e regolarne la sua alimentazione attraverso un potenziometro;
- le due PT-100 (sensori di temperatura ad alta precisione) sono adesso collegate ad una scheda dedicata del sistema di controllo ed acquisizione dati nella National Instruments;
- il software di misura della temperatura e controllo degli elementi scaldanti ha subito diverse modifiche atte a migliorare il controllo e la stabilizzazione della temperatura;
- tutti i cavi di connessione tra le varie componenti sono stati debitamente pre-cablati e marcati secondo le indicazioni di JAEA;
- lo schema elettrico e la relativa documentazione è stata rivista di conseguenza.

- *Rilevazione e misura dei fenomeni di cavitazione nel litio liquido*

Viste le portate di 130 L/s, le velocità tangenziali di 15-20 m/s e le pressioni relativamente basse di 10^{-3} Pa, si deve prendere in considerazione la possibilità che in alcuni punti particolarmente critici dell'impianto ELTL (Figura 96) si verifichino dei fenomeni di cavitazione. In particolare, sono state prese in considerazione l'ingresso della pompa elettromagnetica per la circolazione forzata del litio e l'uscita della sezione di prova.

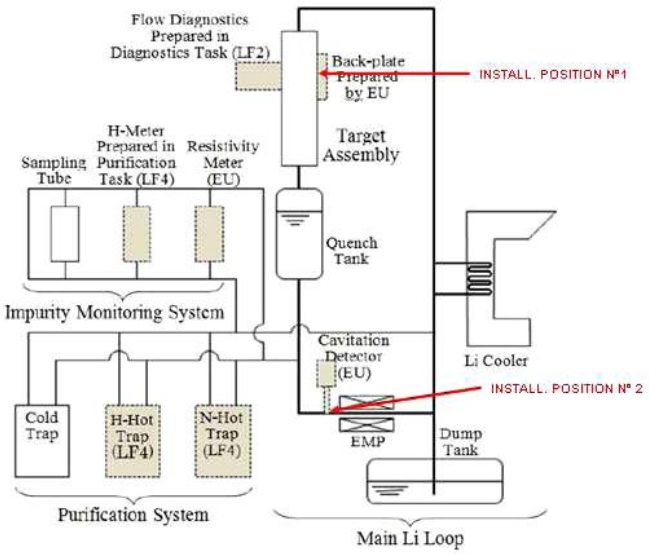


Figura 96. Posizione sensori CASBA per la rilevazione di fenomeni di cavitazione

ENEA ha sviluppato una tecnologia brevettata[6] per la rilevazione e la misura di fenomeni di cavitazione e ha costruito un apparecchio (CASBA 2000) utilizzabile a questo scopo. Il sistema di misura CASBA utilizza un sensore piezoelettrico solidale con la componente meccanica da proteggere, ovvero quella zona dove si suppone si generi il fenomeno della cavitazione.

Il progetto CASBA è stato rivisto alla luce delle moderne tecnologie digitali ed è stato prodotto un nuovo progetto di massima e un nuovo brevetto (in corso di deposito)[7] che rinnova il vecchio brevetto ENEA. Il nuovo brevetto ha costituito il punto di partenza per una progettazione di dettaglio condotta dalla Ditta Evidence (sotto la supervisione di ENEA) al fine avere una stima precisa dei costi di realizzazione di un nuovo apparecchio CASBA 2012, da produrre su piccola scala, che prenderà il posto del vecchio CASBA 2000.

Il CASBA 2012 mantiene tutte le funzioni del CASBA 2000 e ne introduce di nuove:

- nello stesso volume di un CASBA 2000 monocanale è possibile installare fino a quattro canali; il CASBA 2012 è modulare: all'interno dello strumento possono essere installate fino a quattro schede indipendenti ; ogni scheda realizza l'amplificazione ed il filtraggio per un singolo canale;
- non è più necessario un oscilloscopio/analizzatore di spettro esterno: tutti i segnali possono essere visualizzati nel dominio del tempo/frequenza su di un display touch a colori da 7". Lo stesso display realizza l'interfaccia operatore dello strumento. Lo schermo è gestito da una scheda a micro processore ARM con sistema operativo Linux residente su memoria a stato solido. Il processore ARM impiegato ha incorporata una unità DSP (Digital Signal Processing) utilizzata per il trattamento dei segnali opportunamente digitalizzati attraverso convertitori ad alta precisione;
- la presenza di più canali permette una migliore copertura delle parti critiche dell'impianto e un miglioramento sostanziale della sensibilità nel rilevamento dei segnali generati dai fenomeni di cavitazione attraverso algoritmi di correlazione tra coppie di segnali (tali algoritmi permettono l'abbattimento del rumore proveniente da altre sorgenti). Posizionando opportunamente i sensori è possibile inoltre "triangolare" la posizione dell'origine del fenomeno della cavitazione;
- oltre ai consueti segnali di ingresso/uscita analogici, il CASBA 2012 ha anche porte di comunicazioni digitali: una porta Ethernet e un bus di campo di tipo CAN. Le porte di comunicazione digitali permettono una facile integrazione del CASBA 2012 all'interno di moderni sistemi misura e controllo. In particolare la porta Ethernet risulta utile per il trasferimento dati, per l'aggiornamento e la diagnostica da remoto dello strumento; la porta CAN permette scambi dati in tempo reale qualora si vogliano implementare sistemi di controllo automatico atti ad evitare fenomeni di cavitazione nell'impianto sotto esame.

[6] D. Tirelli, P. Gori, "Strumento di misura dell'intensità di cavitazione o ebollizione di un liquido", brev. ENEA rif. SIB 087351, 1989
[7] S. Mannori "Strumento per l'analisi e la misura di segnali provenienti da trasduttori Elettrici sensibili all'intensità di cavitazione o ebollizione in un fluido", brev. ENEA in corso di deposito, 2012.

La consegna del sistema di monitoraggio in Giappone è prevista per la fine del 2012 / inizio 2013, quindi verranno utilizzati i due CASBA 2000 già presenti ed operativi. Si prevede che il primo prototipo del CASBA 2012 sarà disponibile nella prima metà del 2013. La sua integrazione all'interno dell'attuale sistema di monitoraggio non comporterà modifiche rilevanti e potrà estendere in maniera significativa la flessibilità e la precisione della misura dei fenomeni di cavitazione eventualmente presenti nell'impianto.

Tali attività sono descritte nel rapporto tecnico:

- RdS/2012/259 Aggiornamento dei sistemi di monitoraggio delle impurità del litio e del sistema di rilevazione e misura della cavitazione

B.2 Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF

La progettazione dell'impianto IFMIF richiede adeguata valutazione della compatibilità dei materiali strutturali con il litio fluente. È noto da precedenti esperienze che la corrosione delle leghe di ferro in litio è fortemente influenzata dalla presenza di impurezze non metalliche, ed in particolare dell'azoto che può accelerare i fenomeni erosivi/corrosivi.

I parametri di progetto di IFMIF richiedono un rateo massimo di corrosione annuo di 1 µm. Al fine di verificare il rispetto di tali condizioni, nel corso del 2012 è stato finalizzato il progetto dell'impianto Lifus 6, già oggetto di progettazione di massima nel corso del 2011, e realizzate le principali componenti.

Le specifiche funzionali dell'impianto sono:

- temperatura in sezione di prova di 350 °C;
- velocità in sezione di prova di almeno 16 m/s;
- disponibilità di prevalenza e attacchi per l'installazione di un sistema di purificazione e monitoraggio.

Il P&I di impianto, comprensivo delle componenti elettriche e strumentali, è in Figura 97. Sono identificabili due circuiti: il circuito a metallo liquido, con tubazioni da 1" e le linee gas interamente realizzate con tubazioni Swagelok da ½". La linea metallo liquido prevede poi una diramazione necessaria per l'installazione del sistema di monitoraggio on line e dei sistemi di purificazione.

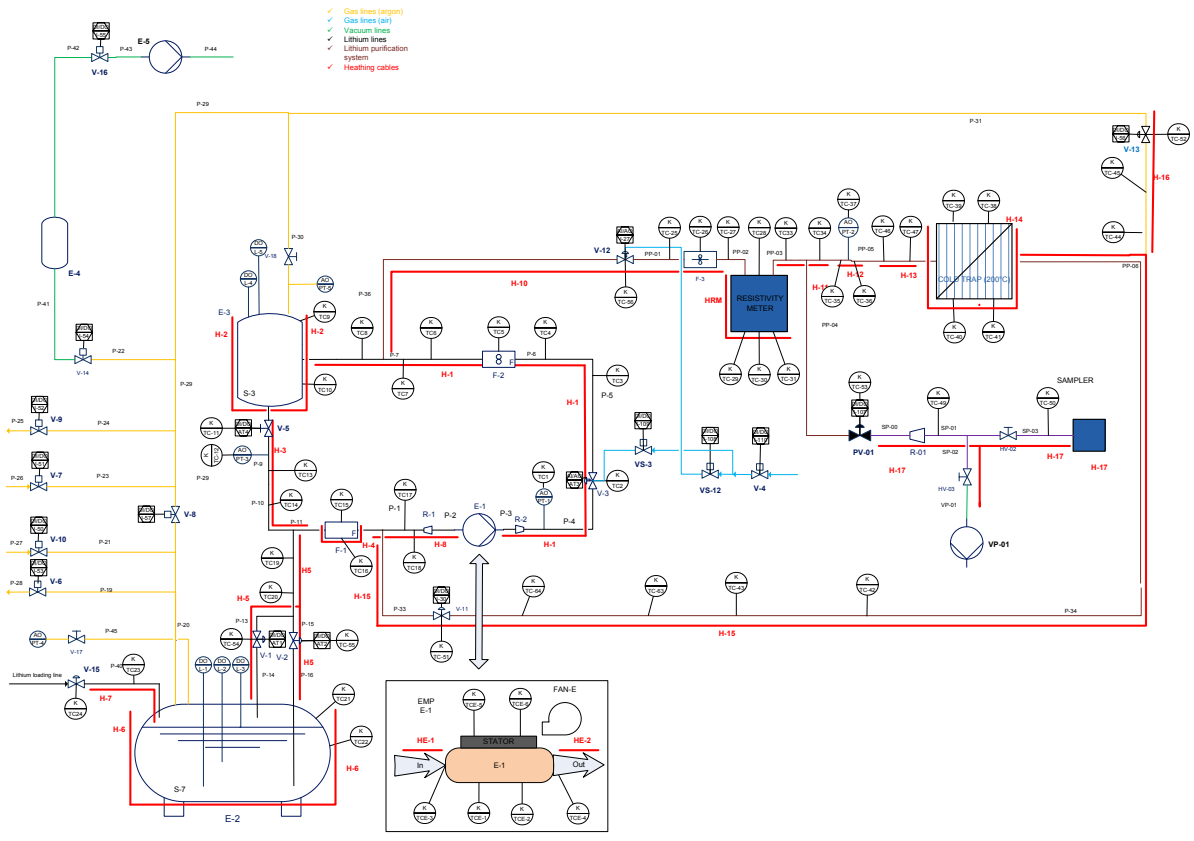


Figura 97. P&I impianto LiFus 6

Rispetto al progetto elaborato nel corso del 2011 è stato modificato il serbatoio, che svolge adesso funzione di trappola calda, ed ha quindi volume maggiore e geometria verticale. All'interno si trova una spugna di titanio che svolge funzioni di getter di azoto.

La sezione di prova è stata profondamente modificata rispetto al precedente layout al fine di migliorarne le prestazioni idrauliche nel rispetto dei parametri di prova. Nell'attuale configurazione vengono ospitati 8 provini, dell'altezza di 8 mm e diametro di 20 mm, con un foro centrale di 8 mm. La presenza di un sistema di centraggio inferiore e superiore evita l'insorgere di vibrazioni per l'elevata velocità del fluido. L'ancoraggio superiore, realizzato mediante una piastra rimovibile, consente una facile estrazione mediante un dispositivo di tipo meccanico. La parte superiore della sezione di prova, per una altezza di circa 300 mm, è riempita di argon, per ridurre al minimo le possibilità di contaminazione del litio.

Tali attività sono descritte nel rapporto tecnico:

- RdS/2012/260 Rapporto di dettaglio sulla progettazione e realizzazione dell'impianto LiFus6 per prove di corrosione da litio

B.3 Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF

La purificazione del litio dagli elementi non metallici (C, O, H, N) in esso disciolti è un elemento chiave nella realizzazione dei test di resistenza alla corrosione esercitata dal metallo. È noto infatti da letteratura come la presenza di non metalli possa drammaticamente accentuare i meccanismi di corrosione nei confronti delle leghe ferrose; in particolare, l'azoto è ritenuto il più dannoso, essenzialmente in ragione della formazione di nitruri di litio ternari (Li_3FeN_2,..), che tendono a solubilizzare gli elementi della lega. Per questo motivo è necessario implementare, all'interno dell'impianto Lifus 6, un insieme di soluzioni in grado di abbattere il più possibile il contenuto delle suddette impurezze.

I componenti principali impiegati a tal fine sono la trappola fredda, il misuratore di resistività e la trappola calda: i primi due sono parte di un circuito secondario appositamente dedicato alla purificazione, che lavora in parallelo col principale, mentre il terzo è inserito direttamente nel circuito principale di Lifus 6, venendo a coincidere col serbatoio di stoccaggio del lLitio, dal quale il circuito viene riempito/svuotato. La portata volumetrica del litio nel circuito di purificazione è settata, attraverso valvola di regolazione, a circa l'1% di quella principale (~ 0,3 L/min), per garantire un tempo di residenza al suo interno sufficientemente elevato.

Lo scopo della trappola fredda è quello di ridurre la concentrazione di C, O, H e N all'interno del litio fluente sfruttando il fenomeno della precipitazione dei corrispondenti composti binari col litio. La trappola (Figura 98) è costituita da un contenitore cilindrico in AISI 316L (volume interno ~ 3 L) riempito con una maglia metallica di

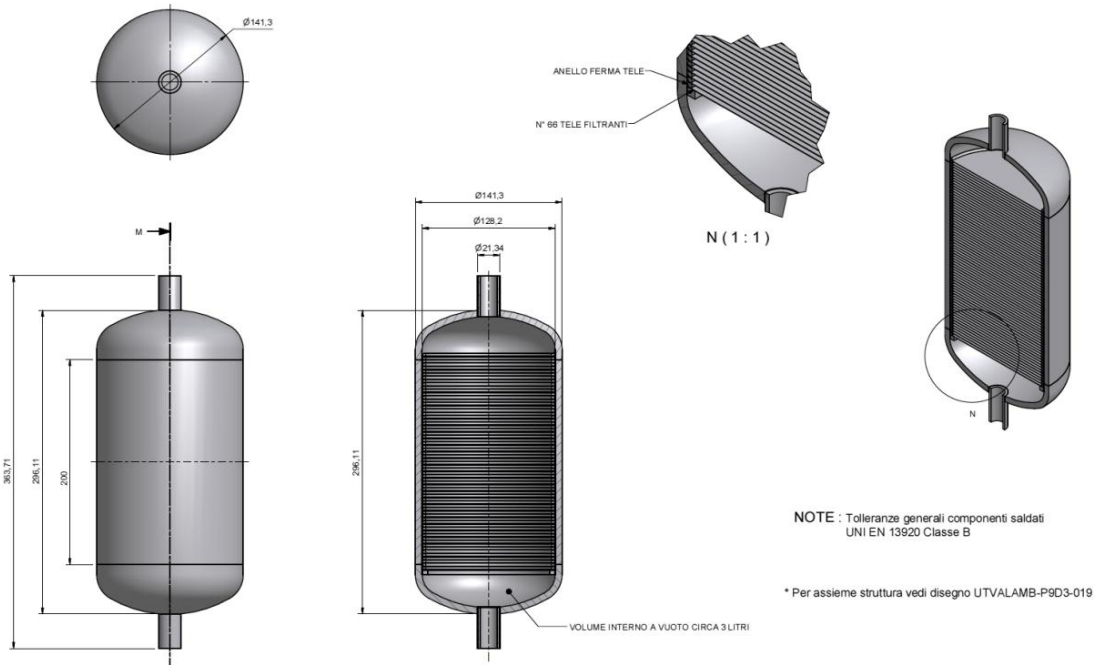


Figura 98. Design della trappola fredda (dimensioni in mm)

acciaio, che agisce come supporto per la nucleazione delle particelle solide di precipitato e per il loro successivo accrescimento. La temperatura di funzionamento della trappola è 200 °C; il tempo di residenza del metallo, circa 10 minuti, è ritenuto, sulla base dei risultati ottenuti nei circuiti contenenti sodio, adeguato a garantire un'elevata efficienza di purificazione (maggiore del 70% ad ogni passaggio). La struttura metallica interna si realizza disponendo in maniera parallela nel corpo della trappola 66 reti metalliche (MESH: 60; diametro filo: 0,18 mm; dimensione cavità: 0,25 mm), ad una distanza di 3 mm l'una dall'altra, determinando una densità di riempimento dell'acciaio pari a circa 300 kg m^{-3}. Impiegando e suddette condizioni operative, le concentrazioni residue di C, O, H e N sono ridotte rispettivamente a 2, 7, 63 e 1461 wppm (= mg per kg di litio).

La trappola calda viene impiegata per ridurre ulteriormente l'elevato contenuto di azoto residuo. Questa trappola è riempita con una spugna di titanio in grani (densità apparente ~ 550 kg m^{-3}), che è in grado di sequestrare l'azoto dal litio, grazie alla formazione alla sua superficie di nitruro di titanio, composto molto stabile. La temperatura operativa selezionata (600 °C) risulta il giusto compromesso fra l'aspetto termodinamico, che renderebbe più quantitativa la reazione a bassa temperatura, e quello cinetico, che renderebbe i processi di diffusione dell'azoto all'interno del titanio più rapidi ad una temperatura più elevata. Operando in queste condizioni per alcuni giorni, la trappola calda è in grado di ridurre la concentrazione di azoto fino a 2 soli wppm.
La purificazione del litio all'interno di Lifus 6 viene quindi effettuata in maniera continua (su litio circolante nell'impianto) per quanto concerne la trappola fredda, mentre viene effettuata ad intervalli di tempi discreti, in maniera statica, per quanto riguarda la trappola calda. E' possibile impiegare il serbatoio di stoccaggio del litio come trappola calda non solo prima di caricare tutto il metallo nel circuito (all'inizio delle operazioni), ma ogni qualvolta il contenuto di azoto abbia raggiunto un valore troppo elevato: in questo caso, è necessario interrompere la circolazione del metallo nell'impianto e scaricarlo nuovamente nello stoccaggio, per dargli di nuovo modo di purificarsi interagendo con la spugna di titanio.
Il monitoraggio della concentrazione di azoto è affidato al misuratore di resistività, un dispositivo in grado di misurare online la resistenza elettrica del litio circolante nell'impianto, con una rapidità di risposta pressoché immediata. Questo dispositivo, sviluppato all'Università di Nottingham in collaborazione con il centro ENEA del Brasimone, si basa sulla variazione della resistività del metallo prodotta dagli anioni in esso solubilizzati: maggiore la loro concentrazione, maggiore la resistività. Tenendo conto che lo ione nitruro è di gran lungo il più solubile nel litio, è possibile imputare la variazione della resistività quasi interamente all'azoto. E' stata inoltre effettuata presso l'Università di Nottingham la calibrazione di questo dispositivo, determinando la relazione lineare, valida per un ampio range di concentrazioni, che collega, ad ogni temperatura, la resistività alla concentrazione di azoto.
Al di là degli evidenti vantaggi, il misuratore di resistività soffre però di una limitata sensibilità, non potendo comunque determinare variazioni di concentrazione di azoto inferiori a circa 55 wppm a 350 °C, col tipo di strumentazione elettrica e strumentale impiegata in Lifus 6. Per superare questo limite ed avere una risposta comparativa, viene pertanto impiegata anche una procedura di analisi offline del litio. Tale procedure prevede di prelevare un piccolo volume di litio dall'impianto, riempiendo un contenitore metallico ad esso connesso e da esso facilmente rimuovibile senza che vi sia contaminazione da parte dell'atmosfera esterna. Operando in argon all'interno di una glove box, questo litio viene trasferito in un pallone a tre colli e fatto reagire con acqua, aggiunta lentamente e prestando attenzione alla esotermicità del processo. In accordo alla reazione:

$$Li_3N + 3H_2O \rightleftharpoons 3\ LiOH + NH_3$$

tutto l'azoto originariamente contenuto nel litio viene convertito in ammoniaca (NH_3). Sotto flusso di Ar, l'ammoniaca viene distillata via e quantitativamente raccolta in una soluzione acquosa contenente un eccesso di acido Borico, per essere trasformata nello stabile ione NH_4^+. La concentrazione di NH_4^+ nella soluzione finale verrà poi determinata attraverso HPLC/IC (cromatografia ionica), una metodica di analisi veloce e semplice, in grado di quantificare fino a soli pochi wppm di azoto originario e con una precisione relativa di qualche punto percentuale.

Il design di tutti gli elementi necessari per la purificazione è stato ultimato; la loro installazione nell'impianto Lifus 6 sta per essere avviata; la validazione delle procedure di purificazione avrà luogo a partire dal prossimo anno.

Le attività sono descritte nel rapporto tecnico

- RdS/2012/261 Rapporto di dettaglio sulla progettazione e realizzazione del sistema di purificazione dell'impianto LiFus6

B.4 Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF

- *Progettazione dei sistemi di connessione rapida per tubazioni denominati FDS*

Il Concetto Europeo di target assembly (TA), conosciuto come target a baionetta, è stato sviluppato con l' obiettivo di semplificare le operazioni per la manutenzione ed ottimizzare i tempi per il suo rimpiazzo o il suo ricondizionamento. I tempi d'intervento per la manutenzione del TA devono essere compatibili con la disponibilità d'impianto, che per IFMIF è fissata al 70%.(11 mesi/anno). Sulla base di tale richiesta di disponibilità dell'impianto la durata massima della manutenzione preventiva in IFMIF deve avere una durata massima di 20 giorni di cui 7 sono dedicati alla manutenzione del TA. A tal fine il TA è connesso con la restante parte dell'impianto a litio per mezzo di connessioni speciali denominate Fast Disconnecting System (FDS). Tali sistemi consentono l'apertura/ chiusura delle flange di connessione manovrando un numero limitato di viti di manovra (normalmente da 1 a 4 viti di manovra; Il loro numero dipende dalle dimensioni della connessione stessa) riducendo sensibilmente i tempi di rimpiazzo del TA. Il progetto del sistema FDS implementato (Figura 99), integra tutte le funzionalità per la connessione delle tubazioni del TA in sicurezza e secondo le specifiche tecniche previste per IFMIF.

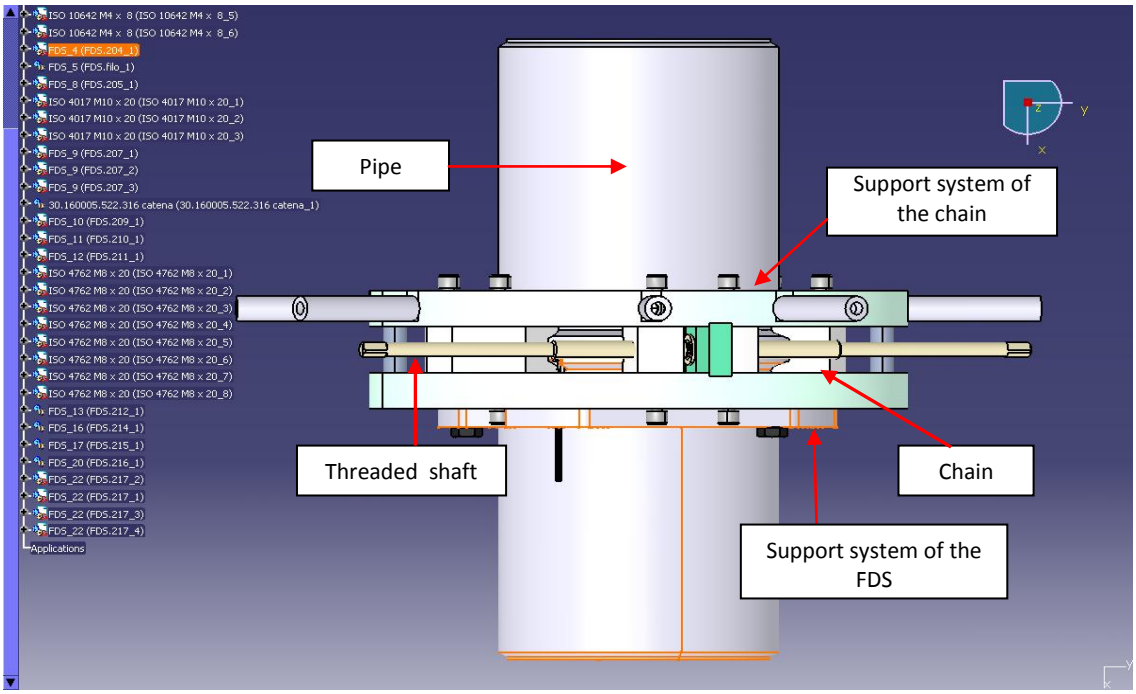


Figura 99. Sistema di connessione rapida FDS

Esso comprende:

1. la catena che trasmette la pressione richiesta dalla guarnizione che sigilla la guarnizione;
2. la vite di manovra che consente di aprire e chiudere la connessione. La vite è accessibile da entrambi i lati per aumentare la flessibilità dell'operazione;
3. i due piatti di supporto della catena: essi hanno la funzione di tenere in posizione la catena quando è in posizione di aperto. Inoltre sui piatti sono ricavate diverse asole che agevolano l'apertura e la chiusura della catena stessa. Dette asole consentono l'operabilità dell'FDS anche in ogni direzione d'installazione: orizzontale, verticale e inclinata;
4. il sistema di rilevamento fuga litio. Questa funzionalità assolutamente indispensabile per l'adozione di tale sistema in ambito IFMIF è basato sul sistema già adottato per gli impianti a sodio;
5. il sistema di tenuta: basato su una guarnizione della Helicoflex (tipo HN per applicazioni nucleari) con ricoprimento esterno in ferro dolce. Tale materiale è stato selezionato poiché compatibile al litio e poiché possiede una durezza inferiore a al materiale delle flange (SS 304);
6. il sistema di disconnessione flange: dopo l'apertura della catena le due flange potrebbero essere incollate dal litio solidificato. Alcune viti permettono la separazione delle due flange;
7. il sistema di sicurezza per l'apertura della catena in caso di bloccaggio della vite di manovra della catena; stessa;

8. il sistema di isolamento : tutto il loop a litio è isolato termicamente incluso tutte le connessioni. Il FDS è stato provvisto di un sistema di isolamento completamente smontabile da remoto;
9. il sistema di connessione rapida delle connessioni è stato progettato per rispondere a tutte le specifiche tecniche previste per il suo uso in IFMIF. Nel prossimo mese di Novembre il sistema sarà qualificato dal punto di vista della sua gestione remota per verificare la fattibilità delle operazioni previste per la sua connessione/disconnessione e per valutare l'affidabilità del sistema implementato.

- *Progettazione delle procedure di remote handling per il TA di IFMIF*

Vi sono due sole alternative per la manutenzione del target assembly: sostituirlo o ricondizionarlo. La sostituzione del TA comporta la rimozione del componente e l'installazione di uno nuovo completo di isolamento termico, diagnostica, sistemi di rilevamento fuga litio e guarnizioni. Il ricondizionamento comporta invece la sostituzione di alcune sue parti e la re-installazione del target cosi ricondizionato. Le principali operazioni di manutenzione per ricondizionamento del TA sono:

1) sostituzione del bersaglio completo di guarnizione e sistema di rilevamento fuga litio;
2) controllo dello stato dell'ugello;
3) controllo del sistema di riscaldamento target;
4) verifica dei sistemi di connessione rapida per le giunzioni flangiate;
5) sostituzione delle guarnizioni sulle flange e dei sistemi di rilevamento fuga litio;
6) verifica dello stato della diagnostica ed eventuale sostituzione;
7) collaudo del TA prima dello start impianto.

Alcune di tali operazioni possono essere fatte online all'interno della TC di IFMIF, come la sostituzione del bersaglio, mentre altre possono essere eseguite solamente in celle appositamente progettate per questo tipo di operazioni (celle calde). Per questo motivo l'attività di manutenzione deve essere attentamente pianificata attraverso una strategia di manutenzione che permetta di completare tutte queste attività ed entro un tempo certo e definito.

L'attuale strategia di manutenzione remotizzata prevede di sostituire il target assembly con uno nuovo o precedentemente ricondizionato, nel caso della manutenzione preventiva, e di sostituire il solo bersaglio nel caso di manutenzione correttiva. Per la manutenzione correttiva si fa normalmente riferimento al bersaglio perché il tempo di vita di questo componente potrebbe essere molto limita mentre ogni altro guasto occorso ad uno dei componenti del target richiede la rimozione dell'intero target e per cui si ricadrebbe nel caso precedente della manutenzione preventiva.

Per la manutenzione preventiva la strategia di manutenzione prevede:

1. la disponibilità di un target nuovo completamente strumentato e pronto per l'installazione;
2. la disponibilità di un target ricondizionato (provvisto di un nuovo bersaglio, di un nuovo sistema di riscaldamento e di fuga litio, completamente ripulito dal litio etc.);
3. il drenaggio dell'impianto completato e la TC di IFMIF aperta;
4. la rimozione dei moduli al alto flusso High Flux Test Module- HFTM) e medio flusso (Medium Flux Test Module-MFTM).

La Figura 100 mostra l'ambiente della TC all'inizio delle operazioni di manutenzione.

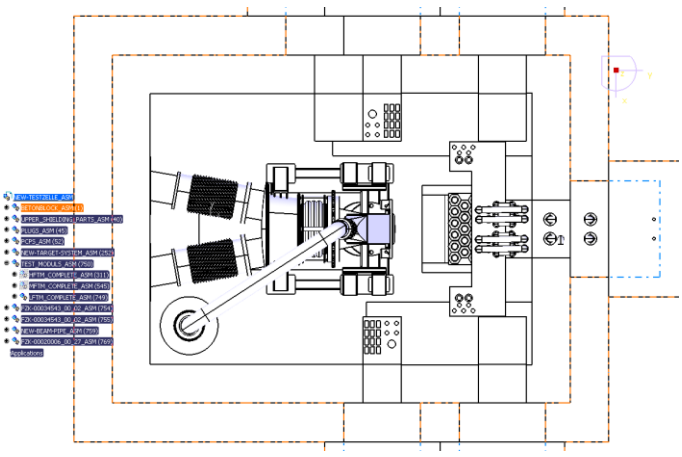


Figura 100. Vista dall'alto della test cell e della posizione del TA

Per quella correttiva, facendo riferimento al solo bersaglio, lo scenario è simile ed il vantaggio è quello di rimuovere solamente una ridotta quantità di materiale attivato. Inoltre per velocizzare le operazioni di rimozione del bersaglio si sta verificando la possibilità di eseguire la sua sostituzione senza rimuovere il modulo MFTM. Questo approccio consente di ridurre il tempo totale di manutenzione poiché la rimozione dell' MFTM richiede comunque un tempo che non è trascurabile. Tuttavia per questo secondo scenario della manutenzione correttiva occorre verificare la fattibilità di tutte le operazioni necessarie. Infatti visto lo spazio disponibile tra il bersaglio e la superficie del modulo MFTM particolare attenzione deve essere posta all'operazione di pulizia per rimuovere i depositi di litio dal telaio di supporto del bersaglio stesso.

L'attuale progetto del TA e le procedure implementate per la sua sostituzione o ricondizionamento consentono di soddisfare le specifiche di IFMIF: IFMIF deve funzionare ininterrottamente per 11 mesi e la durata della manutenzione del TA deve essere completata entro 7 giorni. Restano ancora delle incognite relative a specifiche operazioni, come quella di pulizia del litio depositato sulle superfici, mai testate prima e quindi non ancora validate cosi come alcune delle operazioni di verifica della corretta installazione del TA che sono ancora da approfondire.

- *Adeguamento dell'area sperimentale destinata alle sperimentazioni full scale in condizioni rappresentative del target IFMIF*

Tutte le operazioni di manutenzione remotizzata saranno eseguite nel laboratorio Divertor Refurbishment Platform (DRP) del CR ENEA del Brasimone.

La DRP è un laboratorio che è stato realizzato per le prove di manutenzione remotizzata delle cassette del divertore di ITER, ma è abbastanza generale da permettere di ospitare diverse altre attività di manipolazione remotizzata sia di grossi componenti che di piccoli. Esso è attrezzato con un carroponte su cui è installato un trolley che porta un braccio pesante di tipo telescopico a cui è possibile connettere due diversi manipolatori: uno per operazioni su componenti pesanti, tipo il bersaglio del TA, e un altro avente 4 gradi di libertà aggiuntivi rispetto all'altro manipolatore e che consente di raggiungere ogni posizione del TA su cui occorre operare. Quest'ultimo manipolatore viene usato per portare in posizione i dispositivi usati per la manipolazione: avvitatori, dispositivi di pulizia, micro camere. La funzionalità di utilizzare due manipolatori sullo stesso braccio telescopico viene fornita da un flangia speciale della ditta Schunk. Il laboratorio è dotato di una area di operazioni, che simula una cella calda, e di una sala controllo. La sala controllo e l'area di operazioni sono divise da pannelli che impediscono all'operatore la visione diretta della operazioni. La sala controllo è equipaggiata con un sistema di monitor connessi con le telecamere installate nell'area di operazione. Le telecamere sono installate a parete, su piedistallo e a bordo dei dispositivi robotici. Dalla Sala controllo è inoltre possibile cambiare la configurazione del sistema dei monitor per ottimizzare la visualizzazione dell'operazione in corso e la registrazione di tutte le operazioni. Tutti dispositivi robotici utilizzati nell'area di operazioni sono comandati dalla sala controllo per mezzo di software su PC e di consolle (joystick). Nella presente annualità il laboratorio è stato dotato di:

1. Un supporto di stoccaggio bracci robotici quando non sono in uso. Tale sistema, facilmente estendibile perché realizzato in modo modulare, assolve anche alla funzione di abilitare l'aggancio o il rilascio del braccio robotico che si vuole connettere/disconnettere;
2. Un nuovo sistema di avvitamento. Detto sistema ha tra le principali caratteristiche:
   - Coppia Max 150 Nm
   - Velocità 2- 230 rpm
   - Precisone 3% sul fondo scala della coppia;
   - Controllo in coppia ed angolo;
   - Fornito di sistema di controllo con pannello di programmazione
   - Fino a 25 programmi di avvitamento memorizzabili

   Il sistema è anche provvisto di un sistema di cambio della bussola che viene eseguito da remoto.
3. Due nuove stazioni per la realtà virtuale e per la progettazione dei dispositivi.

   La realtà virtuale è un mezzo indispensabile per la progettazione e prima verifica della correttezza delle procedure e delle operazioni di manutenzione remotizzata. A parte l'hardware che è costituito da due workstation HPZ2600 , 4 monitor e uno schermo da 46", i software selezionati per la realtà virtuale e la progettazione dei dispositivi sono rispettivamente Division Mockup e Matlab. Tali software sono stati selezionati perché l'ENEA ha accumulato negli anni una eccellente esperienza nel loro uso.

Infine è stato completato il progetto del prototipo del TA e della simulazione della sezione di test cell di IFMIF che saranno utilizzate per le prove di manutenzione remotizzata. I prototipi saranno disponibili in DRP all'inizio del 2013.

Le attività di questo sotto-obiettivo sono descritte nei seguenti rapporti tecnici:

- RdS/2012/262 Rapporto sulla progettazione dei sistemi di connessione rapida per tubazioni denominati FDS
- RdS/2012/263 Rapporto sull'adeguamento dell'area sperimentale destinata alle sperimentazioni full scale in condizioni rappresentative del target IFMIF
- RdS/2012/264 Rapporto sulla progettazione delle procedure di remote handling per il Target assembly di IFMIF

B.5 Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target a litio per IFMIF e di dispositivo di purificazione litio dall'impurezza azoto

Nell'ambito dell'attuale fase EVEDA di IFMIF, l'ENEA è responsabile della progettazione del sistema target a litio liquido (target assembly) nella versione europea basata sul concetto di Backplate rimovibile a baionetta, che rappresenta una delle due opzioni previste in IFMIF (l'altra è quella basata sul concetto di Target integrale sviluppato dal JAEA in Giappone). Nel periodo coperto dalla presente annualità dell'Accordo di Programma, il lavoro di progettazione si è principalmente incentrato sui due seguenti aspetti:

- integrazione del target assembly con Backplate a baionetta con la sua struttura di contenimento (Target Test Cell) progettata dal KIT (Europa) e col circuito a litio (lithium loop) progettato dal JAEA (Giappone);
- avanzamento e miglioramento del modello di target assembly esistente, a partire dalla configurazione sviluppata nell'ambito della precedente annualità (2010) e descritta nel rapporto tecnico (Design Description Document I, DDD-I) relativo alla prima fase delle attività di ingegneria condotte in ambito europeo (Engineering Design Activities, EDA).

Il modello 3D finale integrato col lithium loop e il condotto dell'acceleratore (beam duct) è mostrato in Figura 101.

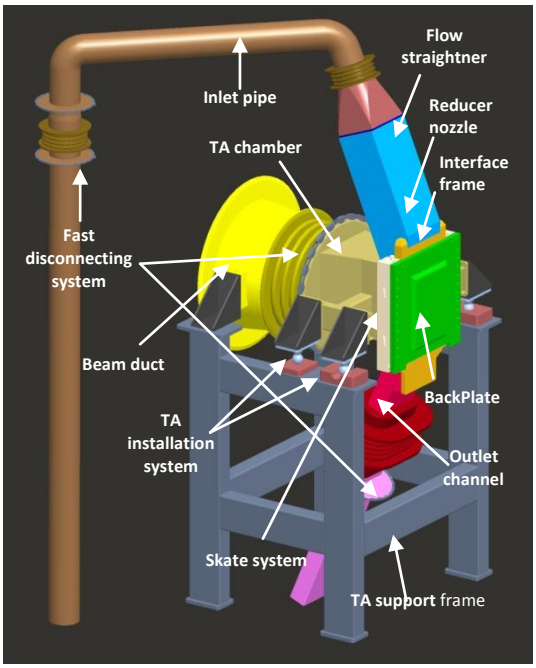


Figura 101.Vista 3D del target assembly integrato nella Test Cell

In merito al secondo punto, in particolare, sono stati introdotti nel modello alcuni elementi che ancora non erano inclusi ovvero:

- le tre connessioni meccaniche del target assembly con i tubi di ingresso e di uscita del Li loop e col canale dell'acceleratore, tutte basate sul sistema di chiusura rapida per tubazioni denominato FDS (Fast Disconnecting System) anch'esso sviluppato nell'ambito del presente Accordo di Programma [Report RdS/2012/262];
- il sistema di posizionamento e allineamento del target assembly;
- la struttura di supporto del target assembly;

- il sistema di compensazione basato su giunti di espansione e di smontaggio per l'assorbimento delle dilatazioni termiche e dei disallineamenti di montaggio.

Parallelamente al lavoro di progettazione, sono state condotte anche alcune attività di modellazione numerica in supporto sia al design sia all'analisi di sicurezza del lithium loop di IFMIF, di cui l'ENEA è responsabile nell'ambito delle attività previste dal Procurement Arrangement ED03-EU relativo al contributo europeo alla progettazione dell'impianto a litio di IFMIF (Lithium Facility).

Per quanto concerne la modellazione in supporto al design, il lavoro svolto si è principalmente incentrato sulla messa a punto degli strumenti software necessari per l'esecuzione dei calcoli neutronici del target assembly che saranno svolti in una fase successiva del progetto. In particolare, è stato acquisito il software di interfaccia McCad, sviluppato dal KIT, in grado di importare il modello CAD del target assembly all'interno del codice neutronico MCNP. Il software è stato installato localmente su una workstation dell'ENEA e attualmente è in corso la fase di training e di preparazione dei modelli CAD opportunamente ottimizzati per la loro gestione in McCad. Sempre per quanto concerne i calcoli neutronici, è stata inoltre determinata la distribuzione bidimensionale di potenza depositata dai fasci di deutoni nel jet di litio, da utilizzare come termine di sorgente termica nei futuri calcoli termoidraulici del target.

Relativamente alle analisi di sicurezza, è stato dato un contributo alla preparazione dei principali documenti di sicurezza di IFMIF per quanto attiene alla parte riguardante la Lithium Facility. In particolare i contributi forniti hanno riguardato il documento relativo ai requisiti di sicurezza ("LF Safety Requirements") e il rapporto generale sull'analisi di sicurezza ("LF Safety Report"), quest'ultimo da integrare nel rapporto generale di sicurezza di IFMIF (Preliminary Safety Analysis Report, PSAR).

Sempre in connessione alle analisi di sicurezza sono stati inoltre eseguiti i calcoli di attivazione per la valutazione della radioattività indotta dai prodotti di corrosione attivati per effetto dei flussi neutronici e gamma generati nel target assembly. Tali calcoli serviranno per valutare, in una fase successiva, la dose indotta dai suddetti prodotti attivati lungo il circuito a litio e stimare quindi anche la dose occupazionale nelle varie aree della Facility.

E' stata infine effettuata una stima (largamente approssimata) dei possibili costi del target assembly di IFMIF comprensivi dei relativi sistemi di Remote Handling, quale contributo all'analisi dei costi complessivi di IFMIF.

L'attività è descritta nel rapporto tecnico:

- RdS/2012/265 Rapporto preliminare del progetto del target di IFMIF comprensivo di disegni, analisi numeriche e valutazione dei costi

C attività per IFERC (International Fusion Energy Research Center)

L'obiettivo C prevede lo sviluppo e caratterizzazione di materiali compositi ceramici SiC/SiC.

C.1 Caratterizzazione proprietà fisiche composito ceramico SiC/SiC

Nell'ambito della attività di modellizzazione si sono integrati nel codice commerciale agli elementi finiti ABAQUS i modelli in grado di risolvere la geometria e il calcolo delle caratteristiche meccaniche equivalenti di un materiale composito con architettura palne weave. L'integrazione è avvenuta scrivendo una apposita user subroutine denominata UMAT che includeva anche il meccanismo di danneggiamento per il composito ceramico SiC/SiC con architettura plane weave. Tale codice è stato convalidato confrontando i risultati numerici con quelli sperimentali.

Il codice sviluppato applica la progettazione multiscala ai materiali compositi. Tale metodologia applicata ai materiali compositi si prefigge, partendo dai dati relativi alle fibre e alla matrice, di ricavare il comportamento del composito. Diventa quindi importante cercare di sviluppare metodologie di prova in grado di caratterizzare i singoli costituenti del composito. Gli yarns che costituiscono il tessuto plane weave sono formati da un certo numero di filamenti che durante il processo CVI sono soggetti ad infiltrazione. Per poter applicare tecniche multiscala occorrerebbe conoscere le proprietà meccaniche dei singoli filamenti costituenti gli yarns e della matrice infiltrata. Tale obiettivo è praticamente impossibile da realizzare ma si può pensare di caratterizzare gli yarns a tal fine si sono ricavati gli yarns dal tessuto plane weave e si sono eseguite su di essi delle infiltrazioni in fase vapore di carburo di silicio per valutare l'incremento delle caratteristiche meccaniche in funzione del grado di infiltrazione.

Il materiale composito ceramico SiC/SiC rappresenta un interessante materiale per un possibile utilizzo come prima parete nei reattori a fusione o come materiale funzionale da utilizzare sempre nei reattori a fusione ma nel ciclo del combustibile. Questa possibilità oltre che definire procedure per la realizzazione del materiale implica da parte dei fabbricanti di tali materiali compositi ceramici la capacità di fornire manufatti di varie geometrie. A tal

fine FN deve realizzare pannelli di spessore 3, 4 e 5 mm e tubi con diametro esterno di 12,7 mm ed interno di 6,3 mm con lunghezza di 220 mm.

Le attività sono descritte nei rapporti tecnici:

- RdS/2012/266 Accordo di Collaborazione ENEA- FN per "Realizzazione di pannelli e campioni in SiCf/SiC per caratterizzazioni fisico-meccaniche"
- RdS/2012/267 Accordo di Collaborazione ENEA- FN per "Realizzazione di pannelli e campioni in SiCf/SiC per caratterizzazioni fisico-meccaniche"
- RdS/2012/268 Development of a multi-scale methodology for composite structural modelling and validation of modelling procedure by mechanical testing - Final Report

C.2 Caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio liquido

Per la caratterizzazione del composito SiC/SiC in litio-piombo sono stati realizzati i seguenti componenti del forno: la camera in acciaio inossidabile, il sistema di traslazione e rotazione del campione, il sistema di sollevamento della flangia di copertura del forno, l'isolamento termico interno del forno con allumina policristallina, le resistenze per il riscaldamento del forno in molibdeno disiliciuro, il supporto interno dei crogioli, i crogioli in carburo di silicio monolitico e la barra rotante per il supporto e la movimentazione del campione in prova.

Le attività sono descritte nel rapporto tecnico:

- RdS/2012/269 Erosion/corrosion of SiC and SiC/SiC in liquid metal - First Report

D. Altre attività internazionali di accompagnamento ad ITER: FAST il nuovo esperimento satellite europeo

D.1 Calcoli strutturali per il sistema magnetico, la camera da vuoto ed il criostato di FAST e analisi del sistema di raffreddamento della macchina FAST

In questo primo obiettivo è stata svolta un'analisi preliminare del sistema magnetico usato per confinare il plasma e della camera da vuoto in cui è contenuto il plasma stesso. L'analisi strutturale di questi sistemi è stata svolta per gli scenari di plasma di riferimento. E' stata inoltre svolta un'analisi dell'interazione di questi sistemi con il sistema di "Remote Handling" (sistema studiato nell'Obiettivo D.2).

Lo studio, partendo da un disegno concettuale della macchina, è stato finalizzato allo sviluppo del progetto ed alla valutazione strutturale del nucleo centrale della macchina FAST e di un suo componente fondamentale per lo smaltimento dell'energia termica contenuta nel plasma: il divertore. Per questo studio sono stati sviluppati opportuni modelli elettromagnetici e strutturali agli elementi finiti in 3D, adottando opportune proprietà omogeneizzate per i materiali quando necessario. Nel calcolo delle forze applicate sono stati presi in considerazione i maggiori carichi elettromagnetici ipotizzabili a seguito di eventi anomali, quali lo spostamento verticale dell'anello di plasma seguito da disruzione rapida. Sono state analizzate in particolare, dal punto di vista strutturale, le bobine del trasformatore centrale e la camera per il plasma. La camera da vuoto è provvista di finestre verticali (sopra e sotto), equatoriali ed oblique per un numero totale di circa 90 accessi , disponibili per diagnosticare il plasma, i vari sistemi di riscaldamento ed il Remote Handling. La camera, divisa in moduli di 20°, è realizzata in acciaio Inconel, mentre le finestre sono realizzate in acciaio inossidabile. Gli eventi più "catastrofici", da un punto di vista strutturale, sono le perdite improvvise del plasma (distruzioni), dovute ad una instabilità nel movimento verticale del plasma stesso (VDE). Lo studio di questi eventi, nello scenario di riferimento di FAST (corrente di plasma I_p=6,5 MA e campo toroidale B_T=7,5 T) ha evidenziato un forza verticale sulla camera da vuoto di 12,5 MN. Gli stress indotti dalla VDE sono stati modellati usando un settore di 20° con simmetria ciclica come condizione al contorno. Il codice ABAQUS è stato usato per una estesa analisi tri-dimensionale, ottenendo come risultato un stress Von Mises medio di circa 250 MPa ed uno spostamento massimo di circa 14 mm.

Per l'analisi del sistema magnetico e del supporto meccanico usato per sostenere tutta la macchina, sono state usate le forme di corrente date dagli scenari di Fisica ed il codice ANSYS. L'analisi termica delle bobine ha evidenziato, che la durata di tutti gli scenari è sempre limitata dal riscaldamento dell'avvolgimento toroidale, per cui è stato imposto un ΔT massimo di circa 150 K. Durante l'impulso la corrente nella singola bobina toroidale (ce ne sono 18 spaziate di 20°) è di 3,79 MA per una un'energia magnetica immagazzinata di circa 1,35 GJ; durante il flat-top della scarica la forza versoi il centro sulla bobina è di 51,8 MN, mentre la forza verticale su metà della bobina è di 540 MN. La bobina toroidale è tenuta insieme da una struttura a forma di "C" in acciaio, legata, sopra e sotto, da un anello in fibre di vetro. La stessa struttura è anche usata per il supporto degli avvolgimenti poloidali. Un'analisi 3D completa degli stress è stata svolta considerando le forze in piano e fuori piano, ivi incluse le torsioni. L'analisi ha mostrato la necessità di irrobustire in singoli e ben localizzati punti alcune delle strutture, ma la

contempo ha mostrato una più che soddisfacente capacità del presente disegno di rimanere ben al di sotto dei limiti strutturali dei materiali usati.

D.2 Analisi del sistema di Remote Handling (RH)

Il sistema di RH è stato studiato per un componente interno alla camera da vuoto per il plasma: il divertore. Sono state apportate opportune modifiche al disegno concettuale, necessarie per realizzare un efficace sistema di RH e per garantire l'integrità strutturale della macchina nelle diversi condizioni operative. Al fine di confrontare diverse soluzioni e rivedere criticamente il progetto, è stato sviluppato un opportuno sistema di Realtà virtuale. Inizialmente è stata considerata la possibilità di usare una soluzione analoga a quella già ampiamente studiata e proposta per ITER. Tuttavia una serie notevole di incongruità, connesse a a fattori, come il peso, la diversa geometria e dimensioni, hanno evidenziato la necessità di sviluppare una diversa soluzione. Attraverso una serie iterativa di revisione del design, fatta in collaborazione con il gruppo finlandese (VTT) che sta attualmente sviluppando il sistema per ITER, ha permesso lo sviluppo di una nuova soluzione, ivi incluso un sistema di supporto molto flessibile, per permettere l'uso di diverse geometrie di divertore. Un lavoro futuro è chiaramente necessario per testare con un sistema virtuale 3D la cinematica dell'intero processo di sostituzione del divertore.

Leattività degli obiettivi D.1 e D.2 sono descritte in dettaglio nel rapporto tecnico:

- Rds-2012/270 Studio della camera per il plasma, delle bobine e del sistema di remote handling per la macchina FAST

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Obiettivo A

Per l'espletamento dell'obiettivo A.1 è stata coinvolta la società del Gruppo Malacalza, **ASG Superconductors**, a cui è stata affidata dall'ENEA la realizzazione delle 9 bobine di campo toroidale della macchina JT-60SA. La società è impegnata anche nella realizzazione degli avvolgimenti delle bobine di campo toroidale della macchina sperimentale ITER. La scelta di ASG è stata dettata oltre che dalla sua unicità nel panorama industriale italiano anche dall'enorme esperienza acquisita nel corso della sua più che ventennale attività di realizzazione di elettro-magneti superconduttivi, che implica l'adozione di numerosi processi speciali come le tecniche di avvolgimento, di impregnazione e di saldatura della bobina nella cassa di contenimento.

Per l'espletamento dell'obiettivo A.2 è stata coinvolta la società **Walter Tosto**, un'azienda leader a livello mondiale nella caldareria, che produce apparecchi ad alto livello tecnologico per i settori Oil and Gas, Petrolchimico, Power Generation e alimentare/farmaceutico. La società si è aggiudicata la fornitura delle 18 casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA. La società è inoltre impegnata, insieme ad Ansaldo Nucleare e Mangiarotti, nella fornitura di 7 dei 9 settori del vacuum vessel di ITER.

Per l'espletamento dell'obiettivo A.3 è stata coinvolta la Ditta **Energy Technology srl** che possiede un vasto bagaglio di esperienze in applicazioni di elettronica di potenza su apparati sperimentali e su sistemi dotati di interruttori statici. L'Energy Technology srl ha rilevato la Ditta O.C.E.M. con cui l'ENEA ha avuto in passato proficui contatti. L'Energy Technology ha conservato la struttura, la dotazione strumentale e l'organico del personale della Ditta O.C.E.M. Quest'ultima ha stipulato con ENEA contratti per impianti della macchina FTU ed ha partecipato al progetto di massima di sistemi di alimentazione di macchine proposte da ENEA.

Obiettivo B

Tutte le attività di progettazione e di realizzazione relativa alla linea B sono condotte in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Palermo e con le seguenti ditte:

1) Telerobot SPA (Genova);
2) Tagliaferri srl (Calenzano - PO)
3) Lima Inox srl (Ozzano dell'Emila - BO)
4) Ober SPA (Granarolo - BO)
5) Ferretti srl (Marzabotto - BO).

Obiettivo C

La tecnologia per la realizzazione di materiali in SiC/SiC basato sulla tecnologia CVI (Chemical Vapor Infiltration) è stata sviluppata dalla ditta **FN (Nuove tecnologie e servizi avanzati)**. Il lavoro è consistito nella messa a punto di un processo che prevede la realizzazione di preforme e una successiva deposizione di un interfase di carbonio e dell'esecuzione di successivi cicli di infiltrazione per la densificazione delle preforme.

La costruzione del forno per la caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio piombo liquido è in fase di esecuzione presso la ditta **Isolceram** specializzata nella progettazione e costruzione di apparati per l'industria e la ricerca scientifica.

Obiettivo D

Per l'espletamento degli Obiettivi D.1 e D.2 il personale ENEA ha dato un notevole contributo nella fase di definizione dei dati di Input (scenari di plasma, design della macchina, input sui vari sistemi di divertore e di prima parete). Nel prosieguo delle attività il personale ENEA ha avuto un ruolo di coordinamento e monitoraggio delle attività svolte da un gruppo di Ingegneri del **Consorzio CREATE**, che, a loro volta, hanno strettamente collaborato con il gruppo Finlandese VTT per la parte di RH.

Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti

La valorizzazione energetica di biomasse e residui di lavorazioni agricole o industriali e dei rifiuti, disponibili localmente in quantitativi contenuti, può essere ottenuta attraverso la produzione di biogas, mediante digestione anaerobica (DA) delle biomasse fermentescibili, e di syngas, mediante gassificazione delle biomasse ligneo-cellulosiche; il biogas prodotto può essere immesso nella rete gas nazionale, dopo opportuna purificazione ed upgrading, oppure il biogas e il syngas possono essere utilizzati in sistemi di piccola taglia distribuiti sul territorio (da qualche decina di kWe al MWe) per generazione di elettricità e calore in cicli termici (motogeneratori, turbogeneratori, moduli ORC) o in cicli elettrochimici (celle a combustibile ad alta temperatura).

È indubbio che nel settore della digestione anaerobica l'industria sia presente con prodotti maturi ed affidabili, tuttavia è altrettanto indubbio che la ricerca in questo campo è in pieno fermento poiché sono tante le sfide da affrontare, soprattutto in Italia.

Sono necessari digestori anaerobici di piccola-media taglia, che si adattino al panorama italiano, dove le aziende agricole, zootecniche o agro alimentari e i sistemi di trattamento delle acque reflue, così come la raccolta di rifiuti, generano correnti di materiale fermentescibile piuttosto modeste e poco concentrate. Questo significa che vanno sviluppati sistemi ad alta resa energetica, possibilmente robusti ed automatizzati in maniera tale da rendere remunerativo l'investimento di capitali necessario per la loro realizzazione.

Un discorso analogo vale per i gassificatori di biomasse lignocellulosiche, che sono una tecnologia ancora non sufficientemente matura sia per i sistemi di piccola che di taglia superiore.

L'altro problema da affrontare è la presenza di contaminanti e la necessità di avere gas con maggiore concentrazione di metano. Anche in questo caso le tecnologie di purificazione e di concentrazione sono ampiamente note e sfruttate in ambito industriale. La sfida da affrontare è la realizzazione di sistemi di taglia medio-piccola con un livello di affidabilità adeguato e con un grado di automazione che riduca l'impegno di personale, arrivando anche alla possibilità di poter essere gestito con un livello di qualificazione professionale compatibile con la realtà nazionale, senza perdere in efficienza e limitando il costo di trattamento e l'investimento necessario. È per questa ragione che si stanno esplorando nuove frontiere: nuovi materiali assorbenti e/o nuovi catalizzatori per l'abbattimento dei contaminanti, membrane polimeriche e/o ceramiche per la separazione della CO_2 dal biogas. È su questi punti che l'ENEA dedicherà uno sforzo particolare nell'ambito del presente Accordo di Programma.

Per quanto riguarda l'impiego di biogas o syngas da biomasse in sistemi di generazione elettrica e cogenerazione di piccola/media taglia, l'individuazione delle tecnologie più adatte alle diverse situazioni e la integrazione delle stesse con il sistema di produzione/purificazione del gas richiedono ancora un notevole impegno di sviluppo e ottimizzazione.

Problemi per molti versi analoghi si presentano anche per le tecnologie più convenzionali, basate sulla combustione delle biomasse in impianti termici e/o cogenerativi di piccola-media taglia, in particolare sulle emissioni di particolato, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e composti organici volatili (COV), per cui è necessario procedere sia agendo sui sistemi di combustione che sviluppando nuovi dispositivi di abbattimento.

Scopo della presente attività è quello di sviluppare un insieme di tecnologie e processi innovativi, da impiegare sia per produzione, clean up ed upgrading del biogas, che per il suo impiego diretto sia per poterlo immettere in rete sia per utilizzarlo in sistemi cogenerativi ad alta efficienza.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo del progetto è quello di contribuire, alla messa a punto di sistemi di valorizzazione energetica dei rifiuti organici e/o delle biomasse sia mediante la produzione, il clean up e l'upgrading del biogas, per poterlo inviare direttamente agli usi finali (immissione in rete o l'autotrasporto), sia attraverso lo sviluppo di sistemi di cogenerazione precommerciali nei quali poter impiegare tale biogas, o syngas da gassificazione delle biomasse lignocellulosiche, in maniera ottimale per produrre elettricità e calore. Si vuole inoltre cercare di ridurre i livelli di emissioni gassose relative a particolati, IPA e COV di impianti di combustione di biomasse solide di piccola-media taglia sia migliorando i processi di combustione sia individuando nuovi sistemi di abbattimento basati su processi di rimozione catalitici.

Un ulteriore obiettivo è quello di fornire alla PA il supporto necessario per la definizione di una roadmap nazionale nel settore e per una partecipazione più efficace alle collaborazioni internazionali.

Le attività in questo campo sono iniziate nel primo triennio con una enfasi maggiore sulla ricerca e sviluppo per l'impiego di biogas e syngas in celle a combustibile, con un graduale spostamento dell'attenzione sulla produzione, clean up ed upgrading dei gas derivanti da biomasse o rifiuti organici in sistemi avanzati, sia per migliorare il livello di affidabilità e di compatibilità ambientale di sistemi di conversione esistenti, sia per ampliare e diversificare gli usi finali (sistemi di generazione avanzati, immissioni in pipeline, ecc.), in linea con le indicazioni del Piano Triennale 2009-2011 della Ricerca di Sistema Elettrico.

In particolare, sulla base dei risultati ottenuti in precedenza, e di quanto reso disponibile presso l'ENEA anche nell'ambito di altri programmi svolti negli ultimi anni, le attività sono indirizzate a:

- ottimizzare i processi di digestione anaerobica, con miglioramento della qualità del gas prodotto (maggiore contenuto di metano, minori impurezze) e con definizione dei parametri ottimali dei processi di co-digestione per diverse tipologie di biomasse e rifiuti;
- migliorare prestazioni e affidabilità dei sistemi di gassificazione delle biomasse disponibili e sviluppare processi di gassificazione innovativi;
- sviluppare processi e sistemi per l'arricchimento in metano del biogas e per la purificazione dello stesso, fino a livelli qualitativi tali da consentirne l'immissione nella rete di distribuzione (CO_2 < 3%mol, H_2S < 6,6 mg/Sm^3 e zolfo totale inferiore a 150 mg/Sm^3);
- sviluppare tecnologie e processi innovativi da impiegare in sistemi cogenerativi ad alta efficienza e limitato impatto ambientale, attraverso la realizzazione di prototipi da laboratorio in scala significativa di sistemi per la produzione di biogas e syngas;
- sviluppare processi per la riduzione delle emissioni gassose da impianti termici e cogenerativi alimentati con biomasse solide mediante miglioramento della combustione e individuazione di sistemi di abbattimento innovativi catalitici.

Il progetto nel PAR 2011 si articola in cinque obiettivi intermedi.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Nell'annualità oggetto del presente rapporto sono stati realizzati e/o completati dispositivi e circuiti sperimentali di laboratorio e impianti pilota di scala significativa, con l'obiettivo specifico di verificare su una gamma più ampia di condizioni operative e su diverse scale la fattibilità di processi e tecnologie oggetto di studio nel corso degli anni precedenti e, contemporaneamente, sono proseguite attività di ricerca di laboratorio e ne sono state avviate di nuove e realizzate analisi modellistiche e studi di fattibilità.

Per quel che riguarda più in particolare il processo di digestione anaerobica sono state svolte, a livello di laboratorio, specifiche attività di ricerca finalizzate ad ottimizzare i processi di produzione di biogas per ottenere miscele arricchite in idrogeno a partire da substrati liquidi (reflui) opportunamente selezionati quali liquame, scotta e glicerolo, mediante l'utilizzo di specifici inoculi microbici, caratterizzati con tecniche di sequenziamento e costruzione di librerie genetiche.

E' stato effettuato lo scaling-up su fermentatori da banco dei processi più promettenti per la produzione di idrogeno e metano dalla scotta e di idrogeno ed etanolo dal glicerolo crudo, sottoprodotto della produzione industriale del biodiesel.

E' stato messo a punto su scala laboratorio un sistema di pretrattamento biologico di substrati ad elevato contenuto di cellulosa e lignina (segatura e trucioli di legno), basato sull'impiego di funghi lignino-cellulolitici opportunamente selezionati, al fine di ottenere un substrato idoneo alla successiva fermentazione anaerobica per la produzione di idrogeno e/o metano. Campioni di biomassa trattata con ceppi fungini sono stati sottoposti a test di fermentazione con un inoculo di microrganismi idrogeno-produttori e, in una seconda fase, a test di produzione di metano allo scopo di verificare la fattibilità di un processo totalmente biologico a più stadi, e i risultati dei test sono attualmente in corso di valutazione.

I risultati delle diverse ricerche saranno progressivamente oggetto di verifica sperimentale a livello di impianto pilota utilizzando il digestore modulare mobile da 6 m^3 (DMM6000®) realizzato dalla Società Ecoinnovative Technologies S.r.l., spin off dell'ENEA di Bologna.

Per quanto concerne il clean up del biogas, sulla base di un'approfondita analisi dello stato dell'arte, sono stati individuati i processi più promettenti di adsorbimento e di rimozione mediante ossidazione selettiva dell'idrogeno solforato (H_2S), nello specifico carboni attivi impregnati con KOH e funzionalizzati con sali di rame e cromo per l'adsorbimento e catalizzatori strutturati a base di vanadio per l'ossidazione, e su di essi sono state condotte campagne sperimentali di valutazione delle prestazioni in termini di capacità ed efficienza di abbattimento, tempi di saturazione, modalità e tempi di rigenerazione. Con specifico riferimento all'uso dei carboni attivi, i risultati sperimentali hanno evidenziato la sensibilità dei materiali testati alla presenza di acqua e portano alla conclusione della necessità di disporre di un sistema di deumidificazione del biogas in uscita dal digestore.

Tra gli obiettivi del precedente AdP vi era anche la realizzazione e sperimentazione di un prototipo di unità di desolforazione in colonna a letto fisso, dimensionata in modo da poter essere accoppiata con l'impianto pilota di digestione anaerobica. Il prototipo, realizzato nel corso della precedente annualità, è stato utilizzato per effettuare prove sperimentali di alimentazione con miscele rappresentative della reale composizione del biogas, studiando in particolare l'effetto della presenza di CO_2 e di CH_4 in diverse percentuali, oltre ad eventuali inquinanti del biogas, sull'adsorbimento dell'H_2S e quindi sulle prestazioni del processo di desolforazione. Obiettivo di questa attività è quello sviluppare un modello matematico del processo da utilizzare come strumento per l'analisi dei dati sperimentali raccolti, per la pianificazione delle future campagne di prove con il biogas proveniente dal digestore pilota DMM6000® e, infine, per la corretta progettazione di un'unità di desolforazione in piena scala.

Nel corso dell'annualità sono proseguiti gli studi e le attività sperimentali relativi alla rimozione dei silossani, che hanno evidenziato una buona capacità adsorbente dei carboni attivi nei confronti di tali inquinanti. In particolare i test eseguiti hanno mostrato che l'adsorbimento su carboni attivi è di tipo fisico, risultando quindi importante la superficie specifica e non il tipo di trattamento chimico subito dal carbone. I sistemi di rimozione dei silossani a carboni attivi potrebbero costituire una soluzione semplice ed economica, adeguata per impianti di piccola taglia, ma, per poter procedere alla definizione di un sistema prototipo, sono necessari ulteriori studi che consentano di valutare il comportamento nel caso di biogas reale, verificando gli effetti legati alla presenza di CO2 e degli altri inquinanti presenti, in particolare H_2S, che come è noto possono competere nell'adsorbimento su carboni attivi.

Parallelamente allo sviluppo di sistemi chimico-fisici per la rimozione dell'H_2S a valle del digestore, sono state svolte attività di ricerca sull'abbattimento dell'idrogeno solforato nel biogas tramite il processo di fotosintesi anossigenica operato dai solfobatteri, già avviate nel corso delle precedenti annualità dell'AdP. Nell'ambito di tali attività, si è proceduto alla messa a punto di tecniche colturali in batch di due ceppi di Chlorobium limicola, DSM 245T e 248 (DSMZ) per monitorare la loro capacità di rimozione dello ione solfuro dal mezzo di coltura, e attualmente si sta procedendo allo studio e alla caratterizzazione della curva di crescita dei ceppi di C. limicola in un prototipo di fotobioreattore per il trattamento del biogas dotato di LED monocromatici, realizzato nel corso della precedente annualità.

Gli studi successivi saranno indirizzati a ridurre i tempi di abbattimento dello ione solfuro attraverso l'ottimizzazione delle condizioni colturali. I processi messi a punto a livello di laboratorio saranno progressivamente oggetto di verifica e valutazione preliminare di fattibilità tecnico-economica utilizzando dapprima miscele simulanti il biogas e, successivamente, il gas reale prodotto dall'impianto pilota di digestione anaerobica DMM6000®.

Per quel che riguarda invece la separazione della CO_2 dal biogas, è stata avviata un'analisi dei sistemi a membrana, sia esplorando la possibilità di sviluppare membrane ceramiche, con la produzione di campioni mediante colatura su nastro o estrusione e successivo trattamento CVD di supporti ceramici microporosi rivestiti con film di membrane inorganiche selettive e la successiva esecuzione di test sperimentali per la valutazione delle prestazioni, sia mediante il completamento e la messa in funzione presso il Centro della Trisaia di un impianto sperimentale per prova e caratterizzazione di membrane polimeriche commerciali e/o sviluppate ad hoc.

Sono state effettuate prove di caratterizzazione, a livello di laboratorio, di alcune membrane polimeriche commerciali per la separazione della CO_2 dal CH_4, volte nello specifico a valutare l'influenza dei diversi protocolli di trattamento sulle caratteristiche delle membrane stesse, studiare la resistenza all'invecchiamento ed investigare l'effetto dell'umidità e degli altri composti presenti nella miscela di alimentazione sulle performance di separazione. I primi risultati sull'effetto dell'umidità non sono incoraggianti: infatti al crescere dell'umidità relativa diminuisce la permeabilità della CO_2.

Parallelamente, sono stati preparati campioni di membrane polimeriche nanocomposite piane in scala da laboratorio, e su queste sono state condotte prove di permeazione in una cella appositamente realizzata nel corso dell'annualità precedente, utilizzando sia gas puri che miscele simulanti il biogas (già privo di H_2S) a concentrazione crescente di CO_2 (30, 40 e 50% v/v).

E' stata effettuata una comparazione tecnico-economica di impianti di upgrading tradizionali (PSA), confrontandone le prestazioni con quelle dei processi a membrana per mezzo di un modello sviluppato nel corso dell'annualità precedente, con specifico riferimento alle condizioni operative tipiche per l'accoppiamento con impianti di DA di piccola-media taglia (produzione di biogas minori di 600 m^3/h). Si è quindi proceduto ad una validazione preliminare del modello utilizzando, per i processi a membrana, i dati sperimentali ottenuti dall'impianto di upgrading disponibile presso il Centro della Trisaia, in grado di processare fino a circa 350 Sm^3/h di biogas.

In particolare, presso il Centro della Trisaia sono stati effettuati test sperimentali finalizzati alla validazione dei modelli numerici e alla valutazione del comportamento selettivo della membrana polimerica commerciale (polieterchetone PEEK) installata sull'impianto, utilizzando miscele binarie CH_4/CO_2.

E' stata implementata e trasferita su server ENEA la piattaforma Web A.I.D.A. (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants), che costituisce uno strumento di calcolo in grado di analizzare alcune tra le filiere bio-energetiche più diffuse nel sistema produttivo nazionale contestualizzandole dal punto di vista territoriale allo scopo di poterne eseguire un'approfondita valutazione sotto i tre aspetti economico, energetico e ambientale che concorrono a determinarne la sostenibilità globale della valorizzazione energetica di biomasse e rifiuti organici di diversa natura.

Il lavoro di trasferimento della piattaforma A.I.D.A. è stato completato con successo migrando la stessa da un sistema Windows 2003 server (server di lavoro) ad un sistema più avanzato e performante quale Windows 2008 server R2 (server di pubblicazione), che ha fornito prestazioni molto soddisfacenti in fase di collaudo ed è stato quindi confermato come piattaforma ideale per l'applicativo stesso.

Per quel che riguarda i processi di gassificazione delle biomasse, è stato realizzato presso il Centro ENEA della Trisaia un dispositivo sperimentale di scala laboratorio, attualmente in grado di operare in condizioni semi-batch a temperature fino a 350 °C, per la sperimentazione di processi idrotermici di trattamento di biomasse. Parallelamente, è stato effettuato uno studio rivolto alla ricerca della migliore soluzione operativa per la produzione di catalizzatori bimetallici (cobalto/molibdeno e nichel/molibdeno su supporto di allumina) per la gassificazione di biomasse con acqua in condizioni supercritiche (SCW), che saranno oggetto di verifiche sperimentali per valutarne le prestazioni e la stabilità utilizzando allo scopo il dispositivo sperimentale dell'ENEA.

Si è inoltre utilizzato un modello matematico sviluppato nel corso della precedente annualità dell'Adp, che prevede l'analisi di equilibrio delle reazioni di conversione del glucosio in condizioni supercritiche, valutando gli effetti della conduzione del processo di gassificazione in condizioni supercritiche di due tipi di biomasse significative come i gusci di mandorle e i fanghi provenienti da impianti di depurazione.

Nel corso della prossima annualità sono previsti la verifica sperimentale del modello mediante prove su miscele acqua/glucosio sul dispositivo ENEA e il successivo il passaggio alla sperimentazioni su matrici reali (fanghi di depurazione, alghe ecc.) in condizioni operative più spinte. A tale scopo, si provvederà a sostituire il riscaldatore dell'impianto in modo da poter effettuare prove di gassificazione in condizioni supercritiche a temperature fino a 450-500 °C.

Oltre allo studio sulla gassificazione con SCW, sono state condotte attività finalizzate ad investigare le potenzialità della produzione di gas naturale sintetico (SNG) da biomasse tramite processi termochimici di gassificazione, che hanno permesso di individuare le condizioni ottimali di esercizio per incrementare la concentrazione del metano nel syngas ed il successivo upgrading a SNG.

Sulla base dei risultati degli studi e ricerche effettuati nel corso della precedente annualità, che avevano portato alla definizione della configurazione ottimale e dalla progettazione di un apparato bench-scale basato su un processo a stadi adiabatici, è stata progettata una unità prototipale per la produzione di SNG mediante la reazione in fase eterogenea tra miscele di gas e di un catalizzatore commerciale a base di nichel all'interno di un'apposita camera di reazione. Il sistema sarà messo in funzione nel corso della prossima annualità dell'AdP, alimentandolo in una prima fase con una miscela di gas simulanti la composizione del syngas, per valutare le prestazioni dei diversi catalizzatori, fissando la portata di alimentazione e studiando le cinetiche di reazione al variare delle condizioni operative. Successivamente, si provvederà ad accoppiare direttamente il reattore di metanazione ad un impianto di gassificazione pilota bench-scale presso il Centro della Trisaia al fine di verificare il comportamento e la durabilità (shelf life) degli stessi catalizzatori in presenza delle impurezze ancora contenute nel syngas a valle del sistema di clean up.

Infine, per quanto riguarda la linea di attività sui sistemi catalitici per il trattamento dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse lignocellulosiche in impianti cogenerativi di piccola-media taglia, avviate nel corso dell'ultima annualità dell'AdP, è stata realizzata il Centro ENEA di Saluggia una linea sperimentale dedicata, costituita da una caldaia da 20 kW alimentata con pellet di legno, da una linea di derivazione e prelievo dei

suddetti fumi, equipaggiata con un apposito dispositivo riscaldato per l'inserimento dei supporti ceramici per le prove preliminari di abbattimento degli inquinanti organici, e dalla strumentazione analitica (da implementare nel prossimo futuro) necessaria per la caratterizzazione dei fumi a monte e a valle del suddetto dispositivo.

Parallelamente, sono stati prodotti da FN alcuni campioni di supporti ceramici, da testare sulla linea sperimentale sopra descritta, ed effettuato uno studio sullo stato dell'arte dei dispositivi filtranti e catalitici disponibili in commercio per l'applicazione su impianti cogenerativi di combustione a biomasse lignocellulosiche, utilizzabili a valle di sistemi di abbattimento tradizionali, finalizzato all'individuazione di materiali filtranti commerciali idonei per la verifica e la sperimentazione sull'impianto di prova installato presso la hall tecnologica Thexas, previa deposizione sui campioni dei supporti filtranti preparati da FN.

E' stata quindi predisposta una matrice informativa in grado di fornire una mappa di materiali di supporto e di principi attivi idonei a trattare le emissioni di particolato e di inquinanti organici in base ai parametri di funzionamento degli impianti in esame (impianti di combustione di biomasse lignocellulosiche con potenze termiche al focolare di almeno 1 MW), quali la temperatura e portata dei fumi, la concentrazione di particolato e la presenza e concentrazione di sostanze che potrebbero danneggiare il catalizzatore.

Sono inserite inoltre nel programma alcune attività a supporto della Pubblica Amministrazione per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore della produzione di energia da fonti rinnovabili, con particolare riferimento alle biomasse, insieme a quelle connesse con la presenza dell'ENEA nei principali organismi internazionali, come l'European Energy Research Alliance (EERA) e il Bioenergy Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), con l'obiettivo di favorire il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali sul tema specifico della bioenergia.

Nel seguito si riporta una descrizione puntuale delle attività svolte e dei principali risultati conseguiti.

A. Ottimizzazione del processo di digestione anaerobica

Le attività hanno riguardato tutti i principali aspetti del processo di digestione anaerobica di diverse tipologie di biomasse e rifiuti, con particolare riguardo all'incremento delle rese di conversione delle biomasse in biogas e allo sviluppo di processi innovativi, indirizzati verso la produzione di idrogeno in aggiunta a quella di metano.

Le attività sperimentali sono state condotte attraverso studi in laboratorio, con l'obiettivo di verificare i risultati più promettenti mediante la realizzazione di apposite campagne sperimentali su un digestore prototipo di taglia significativa.

A.1 Sperimentazione di processi di co-digestione in impianto pilota

I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio degli anni precedenti su processi di co-digestione di biomasse di diversa natura (nello specifico liquami zootecnici e FORSU) sono stati utilizzati per il dimensionamento preliminare, la progettazione e la realizzazione di un impianto pilota mobile di taglia significativa (6 m^3 di volume utile, corrispondenti ad una produzione stimata di biogas di circa 500 litri/ora). L'impianto, indicato con la sigla DMM6000®, è stato costruito nella precedente annualità dell'AdP dalla Società Ecoinnovative Technologies S.r.l., Spin off dell'ENEA di Bologna con una consolidata esperienza nella costruzione ed esercizio di dispositivi analoghi.

Figura 102. Digestore mobile pilota presso il Centro ENEA Casaccia

Il DMM6000® è stato consegnato all'ENEA, dopo l'esecuzione dei necessari collaudi, a fine giugno 2012 e collocato presso il Centro della Casaccia. La Figura 102 mostra l'impianto, montato sul rimorchio utilizzato per il trasporto, all'arrivo presso il Centro ENEA della Casaccia.

Per la messa in funzione dell'impianto era necessario disporre di un'area adeguatamente attrezzata, in grado di ospitare non solo l'impianto stesso, ma anche tutte le apparecchiature e materiali necessari per il suo funzionamento. Il prolungarsi dei tempi per la consegna dell'impianto, uniti a quelli necessari per individuare, all'interno del Centro, un'area adatta allo scopo e al ritardo nella fornitura di alcune componenti essenziali per l'allestimento della linea sperimentale non hanno consentito di avviare il digestore.

L'allestimento della piattaforma che dovrà ospitare l'impianto è attualmente in corso, sia per quel che riguarda la predisposizione dell'area individuata, sia per la realizzazione di una linea per l'alimentazione in continuo del digestore (contenitori per lo stoccaggio delle biomasse, tramoggia di carico, trituratore e pompa monovite) e di una linea a valle del digestore per il trattamento del biogas, con l'inserimento di un sistema per il lavaggio primario (gorgogliatore), raffreddamento e deumidificazione e la realizzazione di un apposito rack per permettere di volta in volta la connessione all'impianto e la sperimentazione di dispositivi per il clean-up aggiuntivo e l'upgrading, oltre all'inserimento di strumentazione in linea per l'analisi in continuo dei principali componenti del biogas (CH_4, CO_2, O_2, H_2S, NH_3).

Una volta completato l'allestimento della linea sperimentale e avviato l'impianto, a partire dalla prossima annualità, il DMM6000® sarà utilizzato per effettuare sperimentazioni con nuovi mix di biomasse e/o di batteri e provare con biogas reale diversi processi e tecnologie di clean up e di upgrading, in modo da ottenere un biocombustibile gassoso "pulito", utilizzabile per la generazione di energia elettrica o per alimentare sistemi a membrana per la produzione di biometano.

A.2 Studi e sperimentazioni in laboratorio per il miglioramento dei processi di digestione e co-digestione di biomasse e rifiuti organici diversi

Le attività svolte in laboratorio erano indirizzate ad esplorare soluzioni diverse in grado, da un lato, di migliorare la qualità del biogas prodotto e, dall'altro, di utilizzare una gamma più ampia di materiali di partenza.

Per quel che riguarda il primo punto, afferiscono a questa linea di ricerca tutte le attività sperimentali mirate a modificare in modo più o meno accentuato, le modalità di conduzione del processo (condizioni operative, separazione fra le diverse fasi, composizione della comunità microbica ecc.) Sono quindi comprese in quest'ambito le ricerche riguardanti la definizione ottimale di mix di substrati mediante tecniche statistiche, la comprensione delle cinetiche interne al processo di DA studiando sia la fase acidogenica/acetogenica, finalizzata alla produzione di idrogeno e propedeutica alla metanogenesi ed infine la metanogenesi stessa.

I principali argomenti delle attività di ricerca svolte presso i laboratori del Centro ENEA della Casaccia sono stati: potenziamento della produzione di metano dal liquame, separazione delle fasi di idrogenogenesi e metanogenesi, individuazione di pool microbici funzionali alla produzione di idrogeno e naturalmente presenti nel liquame. Ulteriori ricerche sono state dedicate allo scaling up del processo di produzione di idrogeno e metano da glicerolo, già oggetto di studio nel corso del precedente PAR.

Parallelamente, sono state svolte indagini molecolari atte a definire la composizione dei pool microbici utilizzati negli esperimenti, che hanno riguardato il completamento della caratterizzazione delle comunità microbiche degli inoculi utilizzati per la produzione di idrogeno, GM e F_{210}.

L'inoculo GM è stato ottenuto da un fango di depurazione con un procedimento di arricchimenti successivi sul solo substrato glicerolo grezzo, scarto proveniente dalla produzione di biodiesel, e senza l'utilizzo di altre fonti di carbonio, mentre l'inoculo F_{210} è stato selezionato da sedimenti marini costieri per acclimatazione in un reattore in continuo (CSTR) per la produzione di idrogeno utilizzando il glucosio come substrato.

La caratterizzazione è stata effettuata tramite la costruzione delle rispettive librerie genetiche, utilizzando i geni che codificano per l'RNA ribosomale 16S (16S rDNA) come marker molecolare. I risultati ottenuti hanno evidenziato una struttura ben definita per entrambe gli inoculi.

L'inoculo GM è dominato da una comunità di Gammaproteobacteria (90% dei cloni isolati) costituita dai genera Klebsiella ed Escherichia/Shigella, e dalla comunità di Betaproteobacteria (10%) costituita dal genere Cupriavidus.

L'inoculo F_{210} è caratterizzato da una comunità di Gammaproteobacteria (55% dei cloni isolati) costituita dal genere Enterobacter e da una comunità di Clostridia (44%) costituita dal genere Clostridium.

- *Produzione di idrogeno: ottimizzazione statistica di mix di substrati*

L'individuazione della composizione ottimale di miscele ottenute con differenti substrati è stata studiata in relazione alla fase acidogenica/acetogenica e finalizzandola alla produzione di idrogeno, fase propedeutica alla produzione di metano. A tale scopo è stato impiegato il nuovo software statistico della Camo, l'Unscrambler X il quale, mediante la progettazione del piano sperimentale e l'analisi statistica multivariata, consente l'ottimizzazione statistica del processo mirato, come già detto, alla produzione di idrogeno.

Per la realizzazione del piano sperimentale sono stati utilizzati 3 substrati - liquame, scotta e glicerolo - selezionati sulla base dei risultati ottenuti nel precedente anno di attività ed il cui smaltimento presenta particolari problematiche legate alla quantità delle produzioni e alle caratteristiche dei substrati stessi. Nella realizzazione dell'attività sperimentale è stato effettuato un scaling up di cinque volte rispetto al volume dei batch impiegati

nella sperimentazione del precedente anno: sono stati utilizzati batch da 590 ml con un volume di fermentazione di 250 ml, alla temperatura costante di 37 °C, in agitazione (120 rpm).

I test di produzione di idrogeno sono stati condotti utilizzando l'inoculo F_{210}. L'elaborazione statistica ha offerto informazioni per poter miscelare i substrati in proporzioni diverse, a seconda delle rispettive disponibilità, pur mantenendo la massima produzione entro un range ottimale sufficientemente ampio. Dai risultati emerge che il liquame, un substrato generalmente considerato non idoneo alla produzione di H_2, in codigestione mostra un aumento della resa di produzione tale da far ritenere interessante il passaggio di scala su impianti pilota. Le fermentazioni seguono un pathway metabolico di tipo acido misto indirizzato soprattutto alla produzione di acido butirrico.

- *Produzione di metano: ottimizzazione del processo di digestione anaerobica*

Le finalità di questa attività sperimentale [Report RdS/2012/304] sono state indirizzate a:

- studiare il ruolo di un consorzio di idrogeno produttori (F_{210}) nella produzione di metano dal liquame;
- separare gli stadi di idrogenogenesi e metanogenesi mediante variazione del pH;
- verificare le potenzialità della comunità di idrogeno produttori presente naturalmente nel liquame nel processo di produzione di idrogeno utilizzando come substrato, la scotta, ricco in carboidrati (lattosio).

I risultati ottenuti possono venir così riassunti :

- la produzione volumetrica di CH_4 (mL/L), la percentuale di CH_4 nel biogas e la resa (mL CH_4/g VS) aumentano in presenza di un inoculo di microrganismi idrogeno produttori;
- l'abbassamento del pH, consente di separare i due stadi della digestione anaerobica, ottenendo una produzione di H_2, un incremento della produzione volumetrica di CH_4, della sua percentuale nel biogas e della resa. In tal modo la produzione complessiva di bioenergia nel doppio stadio risulta ulteriormente incrementata dalla produzione di idrogeno;
- nel liquame è presente una comunità di idrogeno produttori che, incrementata da un consorzio H_2 specifico, consente di ridurre i tempi di produzione di H_2 e di ottenere un incremento sia delle percentuali di idrogeno nel biogas che delle produzioni;
- l'aggiunta di un consorzio di idrogeno produttori abbassa i tempi di massima produzione di metano da 80 a 57 giorni. Inoltre, la velocità di produzione è molto più elevata negli esperimenti con l'aggiunta di F_{210}.

In sintesi, il risultato di questo lavoro è che è possibile incrementare il processo di digestione anaerobica e ridurre i tempi di produzione sia potenziando nel reattore a metano l'attività di produzione di idrogeno, sia separando le fasi di idrogenogenesi e metanogenesi.

Per quel che riguarda più in particolare lo scaling-up del processo di produzione di idrogeno e metano dal glicerolo, sono stati condotti esperimenti utilizzando un bioreattore BioFlo/CelliGen 115 (New Brunswick Scientific, Edison, NJ, USA) da 3 litri, con 1 L di volume di lavoro (37 °C, agitazione continua 120 rpm). Come substrato è stato utilizzato il glicerolo Novaol non sterile diluito con il terreno minimo, senza uso di nutrienti aggiuntivi (concentrazione iniziale di circa 15 g/L). Il bioreattore è stato inoculato con il 10% v/v dell'inoculo GM, preattivato.

Il substrato veniva quasi completamente degradato, con una produzione cumulativa di 3451 mLdi idrogeno. Al termine della produzione di idrogeno 800 mL del fermentato sono stati inoculati con 200 mL di una comunità di metanigeni proveniente da un fermentatore di 2 litri con liquame inoculato con una comunità di idrogeno produttori (F_{210}). La percentuale di metano nel biogas arrivava al 76,7% con una produzione volumetrica di metano di 2,29 litri CH_4/litro.

Altre attività di ricerca sui processi di digestione anaerobica per la produzione combinata di idrogeno e metano sono state condotte presso il laboratorio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Roma "La Sapienza" [Report RdS/2012/286].

In questo caso è stato oggetto di studio un processo di digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU), in co-digestione con altri residui organici di diversa natura, quali fanghi di depurazione di reflui civili e reflui da attività di suinicoltura.

L'attività sperimentale è stata articolata tenendo conto dei risultati ottenuti nel corso delle precedenti annualità del progetto. In particolare, la ricerca è stata condotta secondo una serie di prove sperimentali in scala di laboratorio, secondo le seguenti fasi:

- prove di digestione anaerobica per la produzione di solo bioidrogeno o solo biometano;
- prove di digestione anaerobica per la produzione di biometano dall'effluente del primo stadio di idrogenogenesi;

- confronto tra gli schemi di processo convenzionale e innovativo.

I risultati ottenuti nel corso dell'indagine sperimentale consentono di trarre una serie di interessanti conclusioni circa l'applicabilità del processo investigato e l'importanza di numerosi fattori ai fini dell'ottimizzazione delle rese del processo di fermentazione.

Ai fini della produzione biologica di idrogeno per via fermentativa, lo studio ha evidenziato la fondamentale importanza dell'aggiunta di un inoculo e del suo eventuale pretrattamento, nonché delle caratteristiche specifiche del substrato indagato. Per quanto concerne quest'ultimo aspetto, la produzione di idrogeno avviene prevalentemente quando si utilizzano substrati freschi ricchi in carboidrati, ragione per cui un materiale parzialmente già digerito come il refluo da suinicoltura risulta meno idoneo ai fini del processo.

E' opportuno sottolineare come la scelta dell'inoculo e del tipo di pretrattamento più idoneo per la selezione dei microrganismi idrogenogenici rappresentano due aspetti correlati, in quanto il fine ultimo, ovvero l'ottenimento di un'adeguata selezione della biomassa idrogeno produttrice, può variare da caso a caso a seconda delle specie presenti nei diversi componenti della miscela avviata a digestione. Esistono infatti più tipi di specie di batteri idrogenogenici che raggiungono elevate rese energetiche anche su biomasse complesse quali la FORSU, ed ognuna di esse può essere selezionata dalla comunità microbica iniziale con pretrattamenti diversi.

Essendo la ricerca della produzione di idrogeno da biomasse mediante "dark fermentation" relativamente recente, è fondamentale acquisire un numero sufficientemente elevato di osservazioni sperimentali così da poter individuare i valori ottimali dei parametri indicatori della stabilità del processo, quali il rapporto tra acidità e alcalinità, e di parametri operativi come il carico organico applicabile, la temperatura, il pH, la modalità e l'intensità di miscelazione, i tempi di residenza idraulica e cellulare.

Durante la produzione di idrogeno è opportuno tenere sotto controllo i metaboliti prodotti, che variano al variare dei suddetti parametri operativi, la pressione parziale di idrogeno ed il potenziale redox, in quanto essi risultano un indice dei percorsi metabolici prevalenti, la regolazione dei quali rappresenta il fattore chiave ai fini della massimizzazione delle rese di produzione.

Mediante la digestione della FORSU e di rifiuti agro-industriali è possibile ottenere buone rese di produzione di idrogeno. È tuttavia a tale fine necessario esplorare ulteriormente le condizioni per garantire l'ottimizzazione dei parametri descritti e per incrementare la stabilità del processo.

Per quanto riguarda invece la produzione di metano, le rese energetiche ottenute negli esperimenti di digestione anaerobica condotti nel corso del presente studio sono risultate sempre confrontabili con quelle documentate in altri studi disponibili nella letteratura scientifica, dimostrando la validità del sistema sperimentale ed il buon controllo dei parametri operativi effettuato.

Prendendo in esame in modo più specifico lo studio dei processi di digestione anaerobica con un sistema a doppio stadio, si è scelto di applicare i parametri operativi relativi alle migliori condizioni ottenute nel corso della sperimentazione, corrispondenti al caso in cui si è alimentato il primo stadio (idrogenogenesi) con una miscela FORSU/acqua di diluizione in rapporto 1:3, imponendo un tempo di residenza idraulica pari a 3 giorni ed una temperatura operativa di 41 °C. Per quanto attiene al secondo stadio, si è assunta a riferimento la condizione nella quale il digestato effluente dal primo stadio del processo è stato miscelato, prima dell'alimentazione allo stadio successivo, a refluo da suinicoltura (diluito con acque di lavaggio) in rapporto in peso 4:3. Il tempo di residenza idraulica che è stato assunto è pari a 20 giorni, mentre si è ipotizzata una temperatura di processo pari a 35 °C.

I valori della produzione volumetrica di biogas, calcolati in base ai risultati delle prove sperimentali di processo a doppio stadio, comparati con quello convenzionale a singolo stadio, sono riportati in Tabella 10 . Per quanto riguarda il caso del processo di digestione convenzionale, si è assunto che l'alimentazione sia caratterizzata da refluo da suinicoltura tal quale (senza diluizione con acque di lavaggio).

Tabella 10. Produzione volumetrica e composizione del biogas da processi a singolo e doppio stadio

	Processo a singolo stadio	Processo a doppio stadio	
		Primo stadio	Secondo stadio
Q_{biogas} (Nm^3/d)	1369	995	7757
Q_{CH4} (Nm^3/d)	904	---	5197
Q_{H2} (Nm^3/d)	---	452	---

Indipendentemente dalla tipologia del processo, la co-digestione di substrati poveri dal punto di vista energetico, ma con un discreto potere tampone e contenuto di azoto, quali gli effluenti zootecnici, con substrati con elevata frazione prontamente biodegradabile quali la FORSU, sembra avere molteplici effetti benefici.

I risultati ottenuti nel corso della sperimentazione, se da un lato sottolineano l'importanza di sviluppare impianti dedicati alla co-digestione di diversi substrati, dall'altro evidenziano la necessità di approfondire la conoscenza dei complessi equilibri chimici e microbiologici che si instaurano durante il processo anaerobico e degli effetti su di essi provocati dalla variazione della miscela in alimentazione e delle condizioni operative.

La co-digestione, sebbene richieda una maggior capacità di gestione ed un'approfondita conoscenza del processo anaerobico, favorisce il miglioramento delle rese energetiche specifiche del processo soprattutto in presenza di substrati velocemente fermentescibili, ottimizza le caratteristiche fisico-chimiche della miscela di alimentazione, permette di raggiungere più facilmente la stabilità del processo rispetto alla digestione semplice di un substrato complesso, di diluire carichi organici eccessivi e picchi di concentrazione di sostanze inibenti e consente la stabilizzazione di residui di attività agro-industriali prodotte stagionalmente. In ultima analisi, favorisce la realizzazione di impianti decentralizzati per la produzione di energia, consentendo un buon ritorno economico dell'investimento anche per piccole realtà agro-industriali.

- *Pretrattamenti biologici per la digestione anaerobica di biomasse lignocellulosiche*

Nel corso dell'annualità 2011 dell'Adp, presso i laboratori del Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche dell'Università della Tuscia sono state svolte attività di ricerca su pretrattamenti biologici di materiali lignocellulosici, che rappresentano la componente più abbondante dell'intera biomassa terrestre, per l'ottenimento di substrati idonei alla produzione di biogas e/o idrogeno mediante processi di digestione anaerobica.

Nell'ambiente, la degradazione del materiale lignocellulosico è realizzata principalmente da funghi, generalmente appartenenti al gruppo dei basidiomiceti, denominati "white rot" (WR), che utilizzano la lignina come fonte di carbonio ed energia. Noti come agenti della carie bianca, questi organismi sono responsabili di patologie del legno e di specie arboree; colonizzano il legno e preferenzialmente decompongono la lignina, caratterizzata da una notevole eterogeneità e complessità strutturale, grazie alla produzione di enzimi extracellulari a bassa specificità di substrato (laccasi, Mn-perossidasi, lignina-perossidasi, ecc.). L'attacco fungino è quindi una fase indispensabile della degradazione del materiale lignocellulosico negli ambienti naturali e, predominante sul materiale grossolano, contribuisce alla produzione di materia organica fine generalmente colonizzata dalla componente batterica.

A seguito di queste considerazioni, si è ipotizzato di sfruttare l'azione ligninolitica dei funghi WR per ottenere substrati fermentescibili a partire da biomasse lignocellulosiche al fine di utilizzarli per successive fermentazioni per la produzione di idrogeno e metano. A tale scopo è stata approntata una serie di esperimenti intesi ad identificare il ceppo di funghi WR più performante e le condizioni di crescita più idonee all'idrolisi di materiale lignocellulosico [Report RdS 2012/290]. I test sono stati effettuati utilizzando come substrato del materiale di scarto dell'industria del legno sotto forma di trucioli e/o segatura.

I funghi testati sono cresciuti sicuramente utilizzando sia il materiale in soluzione nel terreno di coltura, sia la biomassa lignocellulosica. Il loro metabolismo causa un aumento di biomassa fungina e una riduzione di quella lignocellulosica, così come una variazione nella composizione del terreno liquido. Pur non essendo possibile separare il fungo dal substrato, una riduzione del peso secco della fase solida (pellet) è comunque imputabile ad idrolisi perché lo stesso è formato da fungo e materiale lignocellulosico.

E' emblematico in questo senso il caso di *P. pulmonarius* sul substrato indicato con la sigla MEL (80 mL di acqua deionizzata, estratto di malto 7,5 g/L e 1 g di segatura di abete), per il quale si passa da un peso secco iniziale di biomassa lignocellulosica di 12,5 g/L ad un peso secco del solido pari a 6,9 g/Lalla fine del processo, come mostrato dal grafico di Figura 103 . Questa riduzione di circa il 50% è il risultato di un notevole processo di idrolisi, dal momento che nel peso secco del solido è compreso anche il consistente peso del micelio cresciuto nelle 5 settimane.

Campioni di biomassa trattata con ceppi fungini sono stati sottoposti a test di fermentazione con un inoculo di microrganismi idrogeno-produttori e, in una seconda fase, a test di produzione di metano allo scopo di verificare la fattibilità di un processo totalmente biologico a più stadi, e i risultati dei test sono attualmente in corso di valutazione.

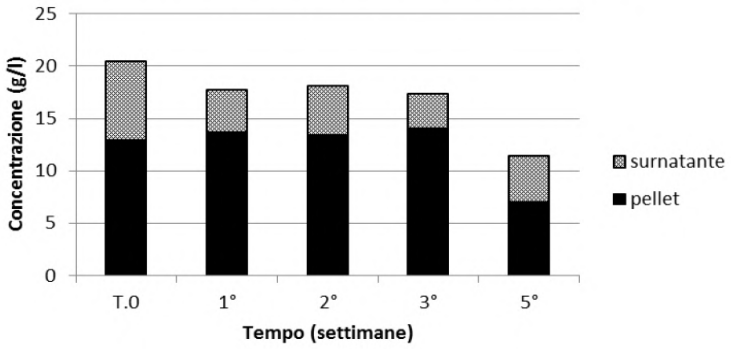


Figura 103. Variazione del peso di pellet e surnatante per colture di P. pulmonarius su segatura di abete

In futuro, al fine di ottimizzare il processo di idrolisi e la produzione degli enzimi coinvolti, si procederà alla selezione di ulteriori materiali lignocellulosici utilizzabili come substrati. Inoltre, una volta individuati i parametri fermentativi ottimali, sarà possibile allestire nuove prove in bioreattore da laboratorio, al fine di simulare processi di pretrattamento di possibile interesse per uno scale-up su dimensioni significative, da realizzare a monte di impianti industriali di digestione anaerobica.

B. Ottimizzazione di processi chimico-fisici di abbattimento degli inquinanti e di upgrading del biogas a biometano

La produzione di biogas costituisce una delle vie più interessanti e suscettibili di ampia diffusione presso una moltitudine di potenziali produttori per la valorizzazione energetica delle biomasse. In particolare, il biogas può essere utilizzato in sistemi di piccola taglia distribuiti sul territorio (da qualche decina di kW al MW) per la generazione di elettricità e calore in cicli termici (motogeneratori, turbogeneratori, moduli ORC) o in cicli elettrochimici (celle a combustibile ad alta temperatura), ma può essere anche immesso, dopo opportuna purificazione e upgrading, nella rete nazionale o in reti locali di distribuzione del gas naturale, contribuendo pertanto alla riduzione del contributo del metano, per la maggior parte di importazione, nella produzione di energia elettrica, calore e, in prospettiva, nel settore dei trasporti.

L'upgrading del biogas a biometano mediante la separazione della CO_2 viene già praticato in diversi paesi, dove il biogas e/o il gas da discarica sono utilizzati per essere immessi in rete o per i trasporti. Le tecnologie impiegate sono tipicamente chimico-fisiche (per assorbimento e/o adsorbimento), mentre relativamente recente è lo sviluppo di sistemi di separazione basati sull'uso di membrane.

Nell'ambito dell'annualità 2011 dell'AdP sulla Ricerca di Sistema Elettrico, il tema della produzione di biometano di qualità adatta all'immissione in rete è stato affrontato potenziando le attività sullo sviluppo di sistemi di depurazione (clean up) per abbattere i contaminanti ed avviando nuove attività sui processi di separazione della CO_2 (fuel upgrading) contenuta nel biogas.

La presenza di contaminanti, in particolare dei composti dello zolfo, nel biogas è critica sia per l'immissione in rete che per l'utilizzo in sistemi di cogenerazione e, di conseguenza, sono proseguiti gli studi e le attività sperimentali sul clean up, iniziati nel secondo anno dell'AdP 2006-2008, con la messa a punto di nuovi materiali sia per i processi di semplice assorbimento che per quelli di conversione chimica (catalizzatori strutturati), ma anche con lo studio di sistemi biologici di abbattimento dell'idrogeno solforato nel biogas tramite il processo di fotosintesi anossigenica operato da solfobatteri.

Parallelamente, sono state affrontate 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, approfondendo in particolare il campo dei sistemi di separazione della CO_2 basati sull'impiego delle membrane, sia polimeriche che ceramiche, al fine di poter disporre di dati sperimentali che consentano di effettuare un'analisi costi-benefici delle possibili soluzioni, individuando anche i margini di miglioramento delle stesse.

Infine, è stata avviata nel corso dell'annualità 2011 dell'AdP una specifica linea di ricerca sul trattamento dei fumi di combustione delle biomasse lignocellulosiche al fine di migliorare l'impatto ambientale della loro valorizzazione energetica in impianti termici e/o cogenerativi di piccola-media taglia, con particolare riferimento alle emissioni di particolato, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e composti organici volatili (COV).

Come azione preliminare all'avvio delle attività sperimentali, è stato realizzato presso la hall tecnologica THEXAS del Centro ENEA di Saluggia un apparato di prova dedicato, costituito da una caldaia da 20 kW alimentata con pellet di legno, da una linea di derivazione e prelievo dei suddetti fumi, equipaggiata con un apposito dispositivo riscaldato per l'inserimento dei supporti ceramici per le prove preliminari di abbattimento degli inquinanti organici, e dalla strumentazione analitica (da implementare nel prossimo futuro) necessaria per la caratterizzazione dei fumi a monte e a valle del suddetto dispositivo.

Parallelamente alla messa a punto dell'apparato sperimentale, è stato effettuato uno studio preliminare sui materiali di supporto e i catalizzatori idonei a trattare le emissioni di particolato e di inquinanti organici, al termine del quale è stata predisposta una matrice informativa in grado di fornire una mappa di quelli potenzialmente utilizzabili in base ai parametri di funzionamento degli impianti in esame (impianti di combustione di biomasse lignocellulosiche con potenze termiche al focolare di almeno 1 MW), quali la temperatura e portata dei fumi, la concentrazione di particolato e la presenza e concentrazione di sostanze che potrebbero danneggiare il catalizzatore.

Le attività relative all'ottimizzazione dei processi di abbattimento degli inquinanti e di upgrading del biogas a biometano, descritte in dettaglio nel seguito, si articolano su cinque diverse linee di attività:

- *B.1 Sperimentazione di un prototipo per il clean up del biogas a valle del digestore*
- *B.2 Studio dei processi di rimozione della CO_2 da biogas per upgrading a biometano*
- *B.3 Sviluppo e caratterizzazione di membrane ceramiche*
- *B.4 Test di membrane polimeriche commerciali e sviluppo di membrane innovative*
- *B.5 Studio delle emissioni di inquinanti da impianti di combustione alimentati a biomasse solide*

Le attività sperimentali sono state svolte presso i Centri ENEA della Casaccia, in stretta collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno e della Facoltà di Ingegneria dell'Università Campus Biomedico di Roma (per la linea di attività B1), della Trisaia, di Brindisi e di Saluggia, con il supporto del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia del Politecnico di Torino e in collaborazione con FN.

Con particolare riferimento alle attività relative al clean up e upgrading del biogas, che vedono coinvolti, oltre ai tre Centri ENEA di Casaccia, Brindisi e Trisaia, cinque diversi partner universitari e il cobeneficiario FN, è stato istituito presso il Laboratorio UTRINN IFC della Casaccia uno specifico coordinamento funzionale, allo scopo di definire in modo chiaro e preciso gli ambiti di intervento dei singoli gruppi di ricerca, evitare duplicazioni di attività e favorire tutte le possibili sinergie fra i diversi soggetti ENEA ed esterni coinvolti nella ricerca.

B.1 Sperimentazione di un prototipo per il clean up del biogas a valle del digestore

Per utilizzare il biogas in applicazioni energetiche o per l'immissione nella rete di distribuzione, è necessario che questo abbia una qualità adeguata in termini di contenuto in metano ed anidride carbonica e sia privo di composti inquinanti e/o dannosi. La presenza di inquinanti, in particolar modo i composti contenenti zolfo, è un punto critico per gli utilizzi finali del biogas dal momento che tali agenti chimici causano la corrosione ed il conseguente deterioramento delle tubazioni e dei sistemi di produzione energetica abbassandone l'efficienza e causando il danneggiamento degli impianti. L'effetto di corrosione e danneggiamento dei materiali è particolarmente evidente e veloce nel caso si lavori in ambiente umido.

Le attività svolte, in stretta collaborazione fra l'ENEA e la Facoltà di Ingegneria dell'Università Campus Biomedico di Roma, si ponevano come principale obiettivo quello di studiare ed ottimizzare processi e sistemi per la purificazione del biogas utilizzando carboni attivi di differente natura al variare delle condizioni operative utilizzando miscele gassose simulanti il biogas ad umidità controllata.

Dagli studi condotti nel precedente anno di attività durante la fase di screening sui materiali utilizzabili per un processo chimico-fisico di adsorbimento, era emerso un effetto benefico dell'umidità intrinseca dei carboni attivi, che favorirebbe la dissociazione di H_2S e la sua conseguente trasformazione a zolfo elementare.

Partendo da questo risultato e dalla considerazione della presenza di umidità nel biogas prodotto da digestione anaerobica, le successive attività sperimentali sono state indirizzate verso lo studio del processo di clean up alimentando il sistema di abbattimento - opportunamente modificato per adeguarlo alle esigenze della sperimentazione - con una miscela di N_2 e H_2S umidificata a valori controllati di umidità relativa (10 ÷ 90% circa) [Report RdS/2012/302].

Le proprietà dei carboni dipendono sia dal processo produttivo (materie prime usate), sia dal processo di attivazione (tramite vapore o agenti chimici) sia da eventuali impregnanti usati per aumentarne le capacità adsorbenti. In molti casi il carbone usato per la desolforazione interviene direttamente nella reazione, dando

luogo ad un'ossidazione selettiva a zolfo e sfruttando contemporaneamente l'elevata area superficiale per l'adsorbimento dello zolfo formatosi.

I materiali testati per le prove sperimentali sono stati carboni attivi commerciali che presentano le seguenti caratteristiche:

- AC1 (RGM3), carbone attivo in pellet di dimensioni 2-3 mm attivato con vapore e impregnato con sali di Cu<8% e Cr<4% con un'area specifica BET pari a circa 1000 m^2/g indicato, secondo le specifiche tecniche, per lavorare sia in assenza che in presenza di umidità;
- AC2 (ROZ3), carbone attivo in pellet di dimensioni 3-4 mm impregnato con KI < 5% indicato, secondo le specifiche tecniche, per lavorare con l'umidità compresa tra il 40 e l'80%.

I materiali in esame possiedono tutti un'elevata area specifica ed una distribuzione omogenea dei pori nel campo dei micro e mesopori di dimensioni compatibili con la molecola di H_2S ed idonee al trattenimento dello zolfo elementare eventualmente formato.

I risultati sperimentali, purtroppo, non hanno confermato in presenza di umidità le ottime prestazioni (quantificate in termini di massa di H_2S rimosso dalla corrente di gas/massa di carbone utilizzato) mostrate dal carbone AC1, alimentando al sistema di purificazione un gas secco, non sono state confermate in presenza di un gas umido.

Il secondo carbone AC2 mostra invece una buona affinità con gas contenenti elevate concentrazioni di umidità (fino all'80%), ma il meccanismo esatto con cui il carbone agisce nella rimozione dell'H_2S, deve essere ancora individuato. Nello specifico il materiale testato sembra essere fortemente influenzato dal variare della concentrazione di H_2S in ingresso, aspetto che naturalmente non deve essere trascurato considerato la forte variabilità di composizione che un biogas può avere al variare della biomassa alimentata al digestore anaerobico.

Ulteriori studi saranno condotti sui due carboni selezionati, sperimentando gli stessi direttamente in un prototipo di unità di desolforazione in colonna a letto fisso, realizzato nel corso della precedente annualità, dimensionata in modo da poter essere accoppiata con l'impianto pilota di digestione anaerobica DMM6000®.

Parallelamente alla sperimentazione sopra descritta, nel corso della presente annualità, è stata anche avviata un'attività di modellizzazione del processo di desolforazione in colonna a letto fisso. L'obiettivo di questa ulteriore attività è quello di sviluppare un modello matematico del processo da utilizzare come strumento per l'analisi dei dati sperimentali raccolti, per la pianificazione delle future campagne di prove e, infine, per la corretta progettazione di un'unità di desolforazione in piena scala.

Date le molteplici modalità attraverso le quali può avvenire la desolforazione in letto fisso su carboni attivi (che vanno dal semplice adsorbimento fisico, alla reazione gas-solido, fino all'ossidazione catalitica in presenza di O_2 nella miscela gassosa), lo sviluppo di un modello robusto, in grado di fornire predizioni attendibili anche fuori dalle condizioni sperimentali in cui è stato calibrato, ha richiesto di operare in modo progressivo, studiando per quanto possibile in modo separato i diversi meccanismi. A tal fine, in questa prima fase, l'attività di modellazione è stata concentrata sull'analisi di dati relativi a miscele più semplici del biogas, che non contengono né componenti che possono competere con l'H_2S per l'adsorbimento sul carbone, né O_2, in modo da escludere l'ossidazione catalitica. In particolare, sono stati presi in esame dati raccolti nelle precedenti annualità dell'AdP e relativi alla rimozione di H_2S da correnti di azoto: in queste condizioni, i meccanismi di rimozione possibili sono l'adsorbimento fisico non competitivo e la reazione con componenti della fase solida.

Due diversi modelli (denominati rispettivamente modello a forza motrice lineare - LDF e modello shrinking core - SC) sono stati sviluppati e calibrati con i dati sperimentali disponibili [Report RdS/2012/302]. I risultati ottenuti sono stati confrontati per individuare il modello con le migliori prestazioni e la scelta ha tenuto conto della capacità del modello di descrivere in modo soddisfacente entrambi i meccanismi di desolforazione, pur mantenendo una formulazione semplice e facilità di soluzione numerica.

Sono stati presi in esame per il modello due diversi carboni attivi (identificati dalle sigle Si30K e RGM3), già utilizzati per prove sperimentali di desolforazione presso i laboratori ENEA, e per entrambi, al contrario del modello LDF, il modello SC si è dimostrato in grado di riprodurre in modo soddisfacente il comportamento dei dati sperimentali con un'unica coppia di parametri fisicamente coerente.

Questo risultato può essere spiegato considerando che, verosimilmente, per i carboni considerati, la rimozione avviene attraverso una combinazione di adsorbimento fisico e reazione chimica gas-solido, in quanto entrambi i solidi uniscono le capacità adsorbenti tipiche dei carboni attivi alla presenza di impregnanti quali KOH (Si30K) o sali di Cu e Cr (RGM3) in grado di reagire con l'H_2S.

Il modello LDF, oltre a contenere importanti elementi empirici, è un modello tipicamente adatto alla modellazione di processi di solo adsorbimento fisico. Al contrario, il modello SC, nei casi come quello in esame in cui la capacità

totale di rimozione si rivela sostanzialmente indipendente dalla concentrazione di H_2S nel gas, si presta a descrivere sia la rimozione dell'H_2S per adsorbimento fisico che quella per reazione con composti presenti nella matrice solida del carbone.

Le capacità totali di rimozione stimate possono essere quindi viste come la somma di un contributo dovuto alla capacità di adsorbimento del carbone, ed uno dovuto alla quantità di reagenti presenti nel solido. Le analisi finora effettuate non permettono di distinguere il contributo dei due meccanismi, ma un approfondimento di questo aspetto, sicuramente interessante dal punto di vista scientifico, potrebbe non essere indispensabile da un punto di vista pratico per lo sviluppo di un modello affidabile dell'operazione di desolforazione in un reattore a letto fisso.

Gli sviluppi successivi di questa attività dovranno sicuramente essere indirizzati a trattare miscele complesse, rappresentative della reale composizione del biogas. In particolare dovranno essere presi in considerazione i dati provenienti dalle attività sperimentali già effettuate e di quelle che saranno svolte in futuro, modificando il modello in modo da tenere conto di diversi altri aspetti quali la possibile ossidazione catalitica dell'H_2S in presenza di O_2, eventuali effetti competitivi con altri componenti della miscela e l'effetto dell'umidità.

- *Uso dei carboni attivi per la rimozione dei silossani*

Tra i vari inquinanti presenti nel biogas, i silossani (provenienti da una vastissima varietà di prodotti quali cosmetici e detergenti) sono altamente dannosi in quanto la combustione di un gas contenente composti di silicio (quali i silossani appunto) produrrebbe un particolato a base di quarzo altamente abrasivo e distruttivo per tutte le apparecchiature coinvolte nel processo di produzione dell'energia elettrica/termica.

Partendo da simili considerazioni, sono state svolte da parte dell'ENEA specifiche attività di ricerca finalizzate all'individuazione di materiali e allo sviluppo di processi per l'abbattimento di questo tipo di inquinanti. Nello specifico, dopo un primo screening su diversi materiali (silica gel, zeoliti, carboni attivi) si è valutato che i carboni attivi mostrassero le migliori prestazioni in termini di quantità di silossano rimosso, per cui tutti gli ulteriori studi sono stati condotti su un numero selezionato di carboni attivi commerciali, con diverse caratteristiche [Report RdS/2012/294].

In particolare, utilizzando come inquinante il solo silossano lineare esametilidisilossano (L2), di massa molecolare 162,38 (il più volatile e, quindi, il più difficilmente rimovibile, oltre ad essere l'unico che si trova commercialmente in bombole a concentrazione nota, in N_2, necessario per poter avere un riferimento certo e per la calibrazione degli strumenti analitici) è stata calcolata la capacità di adsorbimento dei vari materiali, definita come massa di silossano rimossa/massa di carbone utilizzato, al variare di alcuni parametri (massa di carbone utilizzata, granulometria del carbone, concentrazione del silossano in ingresso al trattamento).

Le misure di adsorbimento di silossani hanno evidenziato una buona capacità adsorbente dei carboni attivi nei confronti di tali inquinanti. In particolare i test eseguiti hanno mostrato che:

- l'adsorbimento di L2 su carboni attivi è di tipo fisico, risultando quindi importante la superficie specifica e non il tipo di trattamento chimico subito dal carbone;
- la velocità di adsorbimento dipende dalla concentrazione di ingresso dell'inquinante;
- l'adsorbimento, entro i limiti sperimentali, non dipende dalle dimensioni del pellet;
- la rigenerazione termica a 300 °C sembra essere efficace.

I sistemi di rimozione dei silossani a carboni attivi potrebbero costituire una buona soluzione semplice ed economica, adeguata per impianti di piccola taglia. Per poter procedere alla definizione di un sistema prototipo sono necessari però ancora degli studi che consentano di valutare il comportamento nel caso di biogas reale, verificando gli effetti legati alla presenza di CO_2 e degli altri inquinanti presenti, in particolare H_2S che come noto possono competere nell'adsorbimento su carboni attivi.

- *Rimozione di H_2S per ossidazione parziale selettiva con catalizzatori strutturati*

L'attività è stata svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno.

Nell'annualità precedente è stato effettuato un dimensionamento preliminare di un reattore catalitico per il clean up del biogas mediante una reazione di ossidazione parziale selettiva di H_2S attraverso la valutazione di parametri cinetici di base, quali ordine apparente di reazione ed energia di attivazione.

Il catalizzatore utilizzato è stato il sistema V_2O_5/CeO_2, scelto a valle di un precedente screening di catalizzatori potenzialmente utili, per l'elevata attività e stabilità, nonché per la bassa selettività ad SO_2. Questo sistema, però, ha mostrato una selettività crescente nei riguardi di SO_2 all'aumentare della temperatura e in presenza di un rapporto di alimentazione superiore allo stechiometrico ($O_2/H_2S > 0,5$).

Dal momento che l'obiettivo principale della ricerca è quello di ridurre al minimo la formazione di SO_2 per mantenere elevata la selettività del sistema a zolfo e, allo stesso tempo, essendo intenzionati a studiare un sistema che operi anche con eccesso di ossigeno in alimentazione, è risultata necessaria una differente formulazione del catalizzatore finora usato. A tal proposito è stato effettuato uno studio di natura bibliografica al fine di valutare i fattori da ottimizzare per la nuova formulazione del catalizzatore.

Relativamente alla fase di preparazione del catalizzatore, l'attenzione è stata rivolta alla formulazione di catalizzatori con differenti carichi di vanadio (5-20%) al fine di individuarne il carico ottimale, che garantisse buone prestazioni in termini di attività catalitica e di selettività ad SO_2. Conseguentemente, è stato selezionato il supporto strutturato più idoneo per l'applicazione specifica per procedere alla formulazione di un catalizzatore strutturato. Sono stati scelti rispettivamente un monolite di cordierite con struttura a nido d'ape caratterizzato da 400 cpsi (cellule per pollice quadrato), ed un washcoat commerciale a base di ceria e allumina, quale supporto strutturato e supporto per le specie attive (V_2O_5) [Report RdS/2012/293].

Dopo la fase di preparazione, è stato condotto uno studio sperimentale di verifica della adesione dello strato di washcoat attraverso prove specifiche di resistenza agli ultrasuoni. I risultati di tali prove hanno evidenziato la necessità di un pretrattamento termico del supporto meccanico. Inoltre è stato anche evidenziato che il metodo del dip-coating, se condotto con cicli di deposizione, essiccazione e calcinazione, consente di ottenere gli spessori desiderati (50-100 µm), con una ottima stabilità meccanica in termini di adesione.

Sono state condotte le prove di attività sui due campioni monoliti catalizzati e sul supporto tal quale, e i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti precedentemente su campioni di catalizzatori in polvere, e che costituiscono il termine di riferimento sia per l'attività catalitica che per la selettività.

In particolare, si è studiato l'effetto del carico di vanadio e del rapporto di alimentazione (O_2/H_2S) sull'attività catalitica e sulla selettività del sistema a zolfo elementare.

Relativamente all'effetto del carico di vanadio, è emerso che specie segregate di vanadio non favoriscono la formazione di SO_2 diversamente da quanto si verifica per il catalizzatore avente un carico molto basso di vanadio (2,55% V_2O_5). Infatti, la selettività ad SO_2 è risultata essere inferiore al 7% in condizioni di rapporto di alimentazione stechiometrico e alla temperatura più alta investigata (T = 250 °C).

L'aumento del carico di vanadio, però, non ha determinato notevoli incrementi nella conversione di H_2S. L'attività maggiore (x_{H2S} = 91%) ed una bassa selettività ad SO_2 (4%) è stata osservata per il catalizzatore avente un carico pari al 5% V_2O_5 alla temperatura di 200 °C . Per carichi superiori (8-10% V_2O_5) è stato osservato un peggioramento dell'attività catalitica alla temperatura di 200 °C.

Relativamente alla variazione del rapporto di alimentazione, è stato notato che, all'aumentare della concentrazione di ossigeno in alimentazione (O_2/H_2S = 1), è stato riscontrato un miglioramento dell'attività (x_{H2S} = 98%), ma anche un significativo aumento della selettività ad SO_2 con valori prossimi al 40% alla temperatura di 250 °C. Valori di selettività ad SO_2 trascurabili sono stati ottenuti soltanto lavorando in difetto di ossigeno (O_2/H_2S = 0,4).

I risultati hanno evidenziato che il supporto non ha alcuna attività catalitica, mentre buone prestazioni sono state ottenute per i due campioni di catalizzatori strutturati a base di vanadio alla temperatura di 200 °C.

Per entrambi i campioni la conversione di H_2S è risultata sempre superiore al 90% e la concentrazione di SO_2 inferiore sempre a 10 ppm. L'attività di questi campioni è stata inoltre caratterizzata da un'elevata stabilità durante il corso della prova.

In particolare, il campione 2, ha esibito le migliori prestazioni in termini di attività (x_{H2S} = 99%) e una bassa selettività ad SO_2 (5%).

Dal confronto (effettuato a T = 200 °C) tra i catalizzatori in polvere e i catalizzatori strutturati, i cui risultati sono riportati in Tabella 11. Confronto tra catalizzatori in polvere e strutturati a T = 200 °C, è emerso che questi ultimi hanno mostrato un'attività catalitica elevata, che si attesta sui valori migliori ottenuti anche dai campioni in polvere, e un'ottima selettività ad SO_2, che seppure lievemente maggiore di quella ottenuta dai migliori campioni in polvere, risulta comunque bassa, con concentrazioni di SO_2 inferiori a 10 ppm. Anche per quanto riguarda la disattivazione, non sono stati osservati andamenti apprezzabilmente differenti rispetto alle ottime prestazioni ottenute dai campioni in polvere.

La concentrazione maggiore di SO_2 riscontrata per i catalizzatori strutturati potrebbe essere legata sia alla diversa dispersione del vanadio che si può realizzare sul washcoat, sia ad un carico effettivo di vanadio non esattamente equivalente a quello del catalizzatore in polvere.

Tabella 11. Confronto tra catalizzatori in polvere e strutturati a T = 200 °C

Campione	x H_2S, %	SO_2, ppm	Y SO_2, %
Catalizzatore in polvere V_2O_5/CeO_2 (5%)	95	2	1
Catalizzatore Strutturato - Campione 1	93	10	5
Catalizzatore Strutturato - Campione 2	99	10	5

La diversa dispersione del V_2O_5 potrebbe essere dovuta alla presenza di Al_2O_3 nella composizione del washcoat commerciale, che tipicamente è aggiunta per garantire le necessarie qualità di adesione e stabilità del washcoat alle pareti del monolite.

Nella preparazione dei due campioni strutturati sono stati impiegate due diverse tecniche; in un caso si è scelto di partire da un washcoat a cui erano stati già aggiunti i sali precursori delle specie attive, e nell'altro aggiungendo le specie attive solo dopo la fase di deposizione del washcoat sul monolite, mediante impregnazione in una soluzione del sale precursore.

I risultati hanno portato a prestazioni leggermente migliori per il campione 2, che possono essere sicuramente spiegati con una maggiore uniformità della distribuzione delle specie attive legata alla maggiore solubilità del sale nella soluzione acquosa rispetto al washcoat.

In definitiva, è stato ottimizzata una tecnica di preparazione di catalizzatori strutturati, e sono state condotte prove di adesione del washcoat e di attività catalitica per cui è stato dimostrato sperimentalmente che a partire da monoliti di cordierite con 400 cpsi, e con un washcoat a base di ceria e allumina, è possibile preparare dei catalizzatori strutturati capaci di ossidare in modo selettivo l'H_2S, con conversioni di circa il 95% a 200 °C e bassissime selettività ad SO_2.

- *Purificazione del biogas con sistemi biologici*

Questa attività di ricerca si pone l'obiettivo di studiare la possibilità di abbattere l'idrogeno solforato (H_2S) presente nel biogas tramite il processo di fotosintesi anossigenica operato dai solfobatteri.

Nell'ambito di tale attività si è proceduto, presso i laboratori del Centro ENEA della Casaccia, alla messa a punto di tecniche colturali in *batch* di due ceppi di *Chlorobium limicola*, DSM 245T e 248 (DSMZ), per monitorare la loro capacità di rimozione dello ione solfuro dal mezzo di coltura. Attualmente si sta procedendo allo studio e alla caratterizzazione della curva di crescita dei ceppi di C *limicola* in un prototipo di fotobioreattore per il trattamento del biogas dotato di LED monocromatici, realizzato nel corso della precedente annualità [Report RdS/2012/304].

L'utilizzo di sorgenti luminose a lunghezza d'onda selezionata costituisce uno degli aspetti innovativi del progetto, perfezionando i sistemi di coltivazione in *batch.* Si è lavorato con il dispositivo di illuminazione impostato su due lunghezze d'onda (400 nm e 720 nm, che corrispondono a un flusso fotonico di 32,9 µmol $m^{-2}s^{-1}$e 20 µmol $m^{-2}s^{-1}$), monitorando le colture con tecniche di microscopia in epifluorescenza e determinando la capacità di utilizzo dello ione solfuro mediante cromatografia ionica, dopo aver messo a punto un apposito protocollo sperimentale per l'uso di questa tecnica nel caso specifico.

La coltivazione in batch di *C. limicola* ha dato buoni risultati in termini di volumi di coltura realizzati e di capacità di abbattimento dell'inquinante da parte dei microrganismi, anche se su tempi decisamente lunghi: infatti, a partire dalla concentrazione di circa 80 ppm di ione solfuro presente nel terreno di coltura, se ne ottiene il consumo totale in circa un mese e mezzo, mentre nelle prime due settimane si arriva ad un valore del 62,5%.

Gli studi successivi saranno pertanto indirizzati a ridurre i tempi di abbattimento dello ione solfuro attraverso le ottimizzazioni delle condizioni colturali. Inoltre, sarà testata la tolleranza di C. limicola all'idrogeno solforato, aumentandone progressivamente la concentrazione nel mezzo di coltura, al fine di stabilire il protocollo sperimentale per lo sviluppo dei ceppi nel fotobioreattore.

B.2 Studio dei processi di rimozione della CO_2 da biogas per upgrading a biometano

La Pressure Swing Adsorption (PSA) è una tecnologia diffusamente applicata l'upgrading del biogas a biometano, soprattutto per impianti di relativamente piccola potenzialità. Presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza" è stato implementato un modello di simulazione dinamica che descrive il funzionamento di unità multibed di PSA, a partire dalla conoscenza dell'equilibrio e della cinetica di adsorbimento dei due componenti da separare (anidride carbonica e metano) sul materiale adsorbente

utilizzato, e consente di valutarne parametri sintetici di performance quali la purezza del biometano prodotto, il recupero di metano, la produttività, i consumi energetici [Report RdS/2012/301].

Il modello è stato utilizzato per analizzare diversi cicli e condizioni operative: in particolare, a partire da un ciclo base, con le classiche fasi di pressurizzazione, alimentazione/adsorbimento ad alta pressione (3-5 atm), blow-down e spurgo sotto vuoto (0,1 atm), sono stati studiati cicli che includono step di equalizzazione della pressione, in modo da ridurre i consumi energetici e migliorare il recupero del metano. Per ogni sequenza sono analizzati i risultati di diversi test run, modificando le variabili di progetto in modo da ottenere una specifica di purezza >97% (come richiesto attualmente per il gas naturale immesso nella rete gas italiana), con un recupero elevato (>85%) e consumi energetici bassi.

Lo studio effettuato indica che, a partire da biogas al 50% di metano, è possibile ottenere la specifica di purezza richiesta con recuperi intorno al 90% e consumi di energia del 2,5-3% del contenuto energetico del biometano ottenuto. Il recupero aumenta e il consumo energetico si riduce all'1,5-2% se il biogas ha un contenuto di metano del 65%.

Sulla base dei dimensionamenti effettuati, si è stimato un costo per un impianto di upgrading di circa 530 Nm^3/h di biogas (potenzialità corrispondente all'ottenimento di 1 MWe) intorno ai 1200-1600 k€, tenendo conto dell'ammortamento del capitale, degli oneri finanziari e dei costi di esercizio, un costo del biometano ottenuto di 0,25 €/Nm^3, per un biogas al 50% di metano, o inferiore a 0,2 €/Nm^3 se si alimenta l'impianto con un biogas al 65% di CH_4. Questo costo deve essere aggiunto al costo di produzione del biogas, al costo del pretrattamento del biogas per la rimozione di umidità e inquinanti (in particolare H_2S) e a tutti i costi relativi all'immissione in rete. E' inoltre necessario considerare il problema della destinazione dell'off-gas, che ha un contenuto di metano dall'8 al 18% e dal quale dovrebbe essere recuperata energia termica.

Un confronto con la tecnologia a membrana, sviluppato facendo in particolare riferimento ai risultati ottenuti dall'impianto pilota di upgrading con moduli a membrana realizzato presso il Centro della Trisaia, indica che la PSA consente di ottenere recuperi maggiori con consumi energetici più bassi. Nel caso della separazione con membrana i consumi energetici vanno infatti dal 4,4 % (recupero del 75%) al 5,8% se si vuole ottenere un recupero del 94,5% (in questo caso, però il biometano è reso alla pressione di 31 atm).

- *Impianti di upgrading a membrana realizzati in Europa*

Gli impianti di upgrading basati sulla separazione con membrana non sono a oggi numerosi, e quelli attualmente in esercizio in Europa sono riportati in Tabella 12.

Tabella 12. Impianti di upgrading a membrane in esercizio in Europa[8]

Stato	Località	Uso	Purezza CH_4	Potenzialità m^3/h biogas	In funzione dal
Austria	Bruck/Leitha	Rete gas	97%	180	2007
	Margarethen am Moos	Autotrazione	> 95%	70	2007
Olanda	Beverwijk	Rete gas	88%	130	2006
	Collendoon	Rete gas		50	1993
	Witteveen	Rete gas	88%	300	2010
	Well	Rete gas	88%	600	2011
Germania	Kißlegg-Rahmhaus	Rete gas		500	2010

In Austria la tecnologia con le membrane è stata utilizzata con successo per l'upgrading del biogas a Bruck an der Leitha (180 m^3/h di biogas con produzione di 100 m^3/h biometano) e a Margarethen am Moos (80 m^3/h di biogas con produzione di 35 m^3/h di biometano), entrambi in funzione dal 2007. Impianto più grandi sono stati realizzati in Germania a Kißlegg nel 2010 (500 m^3/h di biogas) e in Olanda a Well nel 2011 (600 m^3/h di biogas).

L'impianto di Bruck/Leitha è un impianto a due stadi in cascata con un unico compressore, e produce biometano al 98±2% di CH_4 con un potere calorifico compreso tra 38,8 e 39 MJ/Sm^3. Le prestazioni sono risultate stabili per almeno 24 mesi, dimostrando l'efficacia dei pretrattamenti introdotti e la buona stabilità delle membrane. E' interessante notare che l'impianto, che alimenta la rete gas locale, sia inserito a valle del digestore e in parallelo ad una unità di cogenerazione a cui viene inviato l'off gas delle membrane. La stessa integrazione è stata realizzata

[8] http://www.iea-biogas.net)

a Margarethen am Moos, dove l'impianto di upgrading è a singolo stadio e il biometano prodotto alimenta una stazione di rifornimento di carburante.

A Bruck, l'immissione in rete avviene a livello locale, nei periodi di maggior richiesta di gas. Nel periodo estivo, quando minore è la richiesta di gas, il biometano prodotto viene compresso fino a 60 bar e inviato ad una rete regionale ad alta pressione. I consumi di energia sono determinati essenzialmente dalla compressione del biogas grezzo: facendo riferimento a una portata di 100 Sm^3/h di biogas con il 65-68% di metano, si riporta un consumo complessivo per l'impianto di Bruck/Leitha (compresi i sistemi di raffreddamento, soffianti, sistemi di controllo) di 37,8 kWh. Un consumo molto simile viene riportato per l'impianto di Kißlegg-Rahmhaus.

Senza entrare nel merito della valutazione dei costi degli impianti a membrana, si riporta solo che per l'impianto di Kißlegg-Rahmhaus, che immette metano in una rete a 55 bar, è stato necessario un investimento di 2100 k€, a cui si devono aggiungere 700 k€ per l'unità per l'immissione in rete (compresi 5,7 km di linea).

- *Confronto con i dati sperimentali dell'impianto presso ENEA Trisaia*

Per confrontare le prestazione di unità di upgrading con la tecnologia PSA e quelle di un processo a membrana sono stati presi come riferimento i risultati della ricerca svolta presso il Centro Ricerche ENEA Trisaia [Report RdS/2012/298] utilizzando moduli a membrana forniti dalla Porogen Corporation (USA). In particolare sono stati usati moduli a fibre cave PEEK-SEP costituiti da membrane high performance poli(eter-eter-chetone) (VICTREX PEEK), che presentano una elevata resistenza chimica.

Come evidenziato dai risultati della sperimentazione, operando con un solo modulo non si riescono ad ottenere allo stesso tempo un gas con un elevato contenuto in metano e un recupero elevato. Tuttavia buone prestazioni possono essere ottenute utilizzando due moduli a membrana, collegati in modo che il permeato uscente dal primo stadio, con un contenuto di metano ancora elevato venga ricompresso e inviato a un secondo modulo, da cui si ottiene un permeato (off-gas) ulteriormente impoverito in CH_4, mentre il ritenuto viene riciclato a monte del primo stadio (configurazione Tandem).

I consumi di energia sono stati valutati determinando la potenza necessaria per comprimere il biogas fino alla pressione massima di alimentazione dei moduli e quella necessaria per comprimere il permeato in uscita. La potenza è stata calcolata considerando una compressione adiabatica a due stadi, con raffreddamento intermedio del gas. Anche se i risultati riportati sono relativi a alcune specifiche condizioni operative testate e non ad un'ottimizzazione del processo, nella configurazione considerata si ottengano purezza e recuperi elevate, ma a spese di un consumo energetico notevole.

Per contro, utilizzando una configurazione "a cascata" (dove si ha un permeato del primo stadio più povero in metano, che costituisce l'off-gas del processo, mentre il ritenuto viene ulteriormente arricchito in metano in un secondo stadio, ottenendo una corrente ricca in metano e un permeato che viene riciclato a monte del primo stadio), si ottiene biometano di una purezza equivalente con consumi energetici più bassi. In questo caso, però, i recuperi di metano sono decisamente inferiori.

In Figura 104 sono confrontate le prestazioni previste per un processo di upgrading mediante PSA con quelle ottenute con le membrane polimeriche.

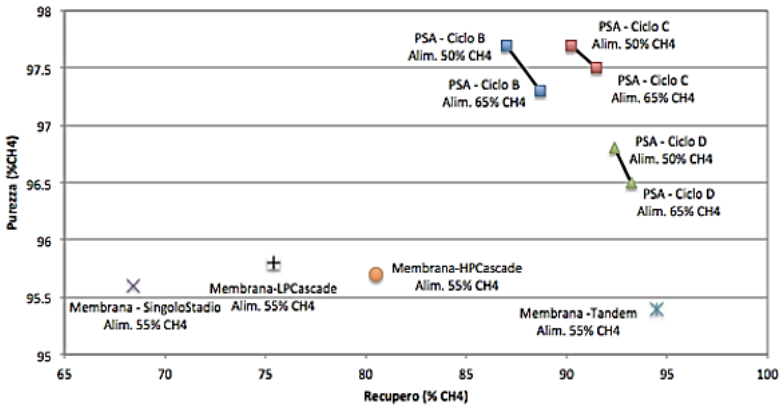


Figura 104. Confronto fra le performance ottenute con processi di upgrading PSA e basati sull'utilizzazione di membrane con diverse configurazioni di impianto

E' evidente come, nelle condizioni esaminate, si ottengano prestazioni migliori con la PSA: in particolare si nota come con le membrane, in tutte le configurazioni, la purezza sia elevata, ma non raggiunga mai il valore del 97% richiesto dalla specifica per l'immissione in rete del gas naturale. Il recupero ottenuto nella configurazione Tandem è migliore di quello ottenuto con la PSA, ma la purezza è significativamente più bassa.

Anche dal punto di vista energetico, il processo di upgrading con moduli a membrana a due stadi appare meno conveniente di quelli basati sulla PSA, anche se è necessario tenere presente che nel processo a membrane il biometano viene reso a pressione più elevata (31 o 17 atm per i due schemi a membrana e 3-4 atm per la PSA). In realtà questo può costituire un vantaggio nel caso in cui il biometano debba essere stoccato in bombole ad alta pressione per poi alimentare motori per autotrazione o se si deve immettere il biometano in reti gas ad alta pressione.

Peraltro, occorre sottolineare che è abbastanza improbabile l'ipotesi di consegna del biometano alle reti ad alta pressione della rete di trasporto nazionale, mentre è più verosimile la consegna alle reti a bassa pressione per la distribuzione locale.

- *Valutazioni tecnico-economiche e confronto fra i processi PSA e a membrane*

Fra le tecnologie utilizzabili per la rimozione dell'anidride carbonica e l'upgrading del biogas per l'ottenimento di un gas (biometano) con caratteristiche simili al gas naturale e che quindi possa essere immesso nella rete di distribuzione del gas, la Pressure Swing Adsorption e la separazione con membrane sono particolarmente interessanti, specie per impianti di relativamente piccola potenzialità, per la facilità di automazione e la semplicità di gestione anche senza la presenza costante di personale specializzato.

Un'analisi tecnico-economica di queste tecnologie richiede, però, una valutazione delle specifiche di purezza del biogas e recupero del metano che possono essere ottenute, della produttività del processo e dei consumi energetici connessi.

Nello studio effettuato è stato preso in esame il processo di Pressure Swing Adsorption, sviluppando un modello di simulazione dinamica idoneo a descrivere il funzionamento del processo con diversi cicli operativi e diverse tipologie di materiali adsorbenti. Il modello è stato utilizzato per valutare le performance del processo utilizzando il materiale adsorbente più diffuso (Carbon Molecular Sieve e modificando le variabili di progetto in modo da ottenere una specifica di purezza >97% (come richiesto attualmente per il gas naturale immesso nella rete gas italiana) con un recupero elevato (>85%) e bassi consumi energetici.

Si è messo in evidenza che:

- è necessario operare con una Vacuum PSA, rigenerando le colonne di adsorbimento sotto vuoto (0,1 atm) per rimuovere la CO_2 adsorbita. La necessità di operare con una VPSA è da porre in relazione all'andamento non lineare dell'isoterma di adsorbimento della CO_2;
- è fondamentale introdurre nel ciclo step di equalizzazione della pressione, soprattutto per migliorare i recuperi di CH_4;
- i consumi energetici per l'upgrading variano dal 2,6-3,1%, nel caso di biogas al 50% di metano, all'1,5-2%, nel caso di biogas al 60% di metano. Questi valori, associati a quelli della produttività, indicano l'importanza di ottimizzare la fase di digestione in modo da alimentare l'impianto di upgrading con biogas con un elevato contenuto di metano;
- il costo dell'upgrading (senza considerare il pretrattamento del biogas, il trattamento dell'off-gas e i costi per l'immissione in rete) è dell'ordine di 0,25 €/Nm^3 se si alimenta un biogas al 50% di metano, mentre scende a valori inferiori a 0,2 €/Nm^3 se si alimenta un biogas più ricco in metano (65% CH_4).

Considerando che in questa fase del lavoro non si è proceduto a una sistematica ottimizzazione dei cicli considerati, è ipotizzabile che ci siano margini per ulteriori miglioramenti, ottenibili sia da un'ottimizzazione della sequenza e della temporizzazione delle fasi del ciclo di PSA che dall'uso di materiali adsorbenti innovativi. In particolare, si nota che in letteratura sono carenti le informazioni su materiali adsorbenti che potrebbero avere caratteristiche migliori (titanosilicati, MOF, ecc.) ed è quindi difficile valutare i miglioramenti di prestazioni che si potrebbero ottenere.

Un confronto con un processo di separazione a membrana, sviluppato facendo in particolare riferimento ai risultati ottenuti dall'impianto pilota di upgrading con moduli a membrana realizzato presso il Centro della Trisaia, indica che la PSA consente di ottenere recuperi maggiori con consumi energetici più bassi; in particolare, si nota che un recupero superiore al 94% può essere ottenuto con due moduli a membrana collegati secondo lo schema Tandem, con una pressione operativa massima di circa 30 atm, ma in questo caso il consumo energetico è dell'ordine di 0,5 kWh/Nm^3 (5,6%). La configurazione con due moduli in cascata, operante a pressione più bassa

(pressione massima 17 bar), consente di ridurre i consumi energetici a 0,39 kWh/Nm^3 (4,4%), ma il recupero del metano scende al 75%.

Nel confronto tra PSA e tecnologia a membrana si deve, tuttavia, tener conto del fatto che il processo a membrana fornisce il biometano a pressione più elevata. E' evidente, quindi, che la differenza nei consumi energetici tra la PSA e la separazione con membrane diventa meno significativa all'aumentare della pressione a cui deve essere consegnato il biometano.

L'analisi effettuata conferma che i processi di upgrading basati sulla PSA o sulla separazione con membrane non possono competere, per quanto concerne il recupero di metano, con i processi basati sull'assorbimento con le ammine, per i quali vengono indicati recuperi superiori al 99,9%. E' però opportuno esaminare in una visione di insieme tutta la filiera che a, partire dalle biomasse, porta alla produzione di biogas e da questo al biometano.

In questa visione di insieme, non è detto che il metano presente nell'off-gas sia da considerare semplicemente come una "perdita" o un componente da rimuovere per esigenze di tutela ambientale; in molti casi, infatti, l'off-gas può essere ancora considerato come una corrente da cui recuperare energia per soddisfare le esigenze di energia termica interne al processo (tipicamente per il riscaldamento del digestore). Nel caso in cui l'upgrading sia in parallelo a un processo di cogenerazione, inoltre, l'off-gas può essere miscelato al biogas grezzo per alimentare l'unità di cogenerazione stessa. Il processo di upgrading può essere quindi ottimizzato non per massimizzare il recupero di metano, ma nell'ottica di ottenere un prodotto con le caratteristiche più idonee per l'uso a fini energetici.

Si nota, infine, che il costo dell'upgrading (inteso strettamente come stadio di rimozione della CO_2) è sempre piuttosto elevato (0,2-0,25 €/Nm^3). Tenuto conto che questo va ad aggiungersi al costo di produzione del biogas, ai costi dei pre e post trattamenti e al costo dell'immissione in rete, si comprende come lo sviluppo della filiera del biogas-biometano come fonte di energia rinnovabile richieda il supporto di adeguati incentivi, come già avviene peraltro negli altri paesi europei in cui è già presente.

B.3 Sviluppo e caratterizzazione di membrane ceramiche

Questa attività è stata svolta dal cobeneficiario FN [Report RdS/2012/292] in collaborazione con il Centro ENEA di Brindisi e si è sviluppate nell'ottica di superare i problemi riscontrati per i campioni prodotti nel corso dell'annualità precedente (impermeabilità ai gas), con l'obiettivo primario di fabbricare prototipi di supporti ceramici per membrane selettive da testare per la separazione della CO_2 nel biogas.

Tali prototipi, dapprima in geometria piana (dischi) e poi in geometria cilindrica (tubi), avrebbero dovuto funzionare come supporti da rivestire con un film membrana in silice realizzato da ENEA C.R. Brindisi allo scopo di effettuare la separazione della CO_2 dal metano.

Il lavoro ha comportato la definizione delle caratteristiche per un prototipo funzionale allo scopo e la realizzazione di diversi manufatti (con particolare riferimento ai bi-strato) a microstruttura a gradiente di porosità. Le maggiori difficoltà consistono nell'ottenere l'ultimo strato, immediatamente sottostante alla membrana, con la giusta porosità e allo stesso tempo sufficientemente robusto da poter essere manipolato e assemblato all'interno dell'alloggiamento di prova.

Gli ultimi dischi in allumina forniti ad ENEA, infatti, poiché la sperimentazione era stata indirizzata ad aumentare il grado di porosità (visto che i primi dischi non mostravano alcuna permeazione di gas), si sono delaminati e fratturati durante il montaggio nella cella di prova. Per questo motivo è stata corretta la sinterizzazione e ad ENEA sono stati consegnati alla fine del mese di luglio gli ultimi prototipi che, dalle analisi di caratterizzazione al porosimetro e dalle immagini ottenute al microscopio elettronico a scansione nei laboratori di FN, risultavano essere sufficientemente tenaci per poterli montare in una cella di prova, ma scarsamente porosi e di conseguenza inutilizzabili per le finalità prefissate.

In parallelo alle attività di produzione di campioni di dischi piani, sono stati fabbricati, sempre utilizzando la tecnica della colatura su nastro e avvolgimento multistrato seguiti da calcinazione in aria, supporti in allumina di geometria tubolare, con l'obiettivo di avvicinarsi il più possibile alle caratteristiche geometriche e meccaniche di quelli usualmente approvvigionati in commercio e utilizzati da ENEA per i test di permeabilità.

A fine luglio è stato consegnato un tubo che presenta il miglior compromesso possibile tra porosità, consistenza/resistenza meccanica e regolarità dimensionale (diametri interno ed esterno, lunghezza, spessore di parete). Alcuni difetti tipici della tecnica di colatura su nastro e sinterizzazione, quali ad esempio piccole bolle superficiali e spessore della linea di sovrapposizione dell'ultimo strato avvolto, non sono però al momento eliminabili.

Di conseguenza, dalle diverse prove di fabbricazione effettuate, è risultata evidente la difficoltà di realizzare con la tecnica di formatura per colatura su nastro e avvolgimento multi-strato un prodotto finito con la geometria regolare richiesta per poter proseguire nella sperimentazione.

In conclusione, se si intenderà in futuro proseguire nelle attività di ricerca sulle tecniche di fabbricazione di supporti per membrane ceramiche, è evidente che i limiti della tecnica di formatura per colatura su nastro di manufatti in allumina sinterizzata sono tali da indirizzare verso processi di fabbricazione alternativi, come ad esempio l'estrusione di plastiche fortemente caricate.

B.4 Test di membrane polimeriche commerciali e sviluppo di membrane innovative

Le attività sperimentali dell'ENEA nell'ambito di questa linea sono state svolte presso il Centro della Trisaia [Report rdS/2012/298], utilizzando allo scopo un impianto pilota di upgrading del biogas dotato di moduli a membrana equipaggiati con membrane polimeriche della corporation americana Porogen, in polimero PEEK.

L'impianto sperimentale per la separazione della CO_2 dal biogas è stato utilizzato per testare differenti miscele bi-componente, contenenti metano ed anidride carbonica nei range di composizione tipici dei digestori anaerobici alimentati da scarti animali, reflui zootecnici e FORSU, al fine di ricavare i parametri caratteristici di processo, consentendo di effettuare simulazioni numeriche per le valutazioni tecnico economiche finalizzate allo sviluppo di processi separativi implementabili agli attuali impianti di produzione di biogas.

La membrana che è stata testata in prima istanza nell'impianto di upgrading ha una configurazione del tipo Hollow fiber in polimero PEEK (polietereterchetone). In condizioni ordinarie il modulo presenta una shelf life a targa di circa 3 anni, anche se molto importante da questo punto di vista è la valutazione dell'effetto degli inquinanti presenti nel biogas nei confronti della matrice polimerica, che sarà oggetto di studio nella prossima annualità dell'AdP. La finalità ultima della presente annualità è stata quindi lo sviluppo di un processo integrato basato sull'impiego di moduli a membrane in grado di massimizzare sia il recupero che la purezza del metano, fermo restando il contenimento dei costi di esercizio legati alle fasi di compressione.

L'impianto di upgrading del biogas installato presso il Centro ENEA Trisaia, mostrato in Figura 105, è costituito dai seguenti macroelementi:

- Modulo di membrane polimeriche;
- Sistema di campionamento gas sulle linee dell'impianto;
- Linea torcia/camino;
- Sistema DCS di comando e controllo comprensivo di valvole, misuratori, indicatori e controllori di pressione e portata, nonché dai collegamenti dei segnali da e verso il DCS.

Figura 105. Impianto a membrane di upgrading del biogas presso il Centro ENEA della Trisaia

L'impianto di upgrading, così dimensionato nel piping e nella strumentazione di comando e controllo è in grado di processare circa 350 Sm^3/h di biogas, corrispondente alla produzione di un impianto di biogas da circa 2 MWth, anche se le potenzialità del modulo sono nettamente superiori.

Il modulo di membrane polimeriche in PEEK è inserito all'interno di un cartridge di contenimento (Figura 106) dimensionato per lavorare in condizioni di pressioni molto spinte, infatti il feed di alimentazione può arrivare anche a 48 bar, con una pressione differenziale con il permeato fino a 41 barg e con range di temperatura che possono arrivare fino ai 70 °C.

Figura 106. Cartridge di contenimento del modulo a membrane

Il modulo può essere alimentato direttamente da biogas compresso o, in alternativa, da pacchi bombole di gas tecnici a composizione fissata, previa regolazione della portata e della pressione. Un sistema di prelievo costituito da campionatore effettua il prelievo del campione on-line della corrente di biogas, al fine di una analisi off-line nei laboratori ENEA per testare le performance del modulo a membrana. L'impianto termina con la combustione della massa gassosa nel bruciatore a valle del sistema di campionamento.

Il cartridge di contenimento è dotato di attacchi a flangiare da 6", con una configurazione tale da riuscire ad accogliere anche moduli di membrane di dimensioni differenti purché inferiori a quelle in esame, e pertanto si presta bene a testare differenti moduli al fine di valutarne le performance di separazione.

Il sistema DCS di comando e controllo è alloggiato in un armadio posto all'interno della sala controllo con porta cieca 1800 x 600 x 400 e pannello touch screen di supervisione HMI. Il sistema comprensivo di valvole, misuratori, indicatori e controllori (pressione e portata) e dei collegamenti verso elettrico e di segnali da e verso il DCS gestisce i seguenti segnali in input ed output:

- Regolazione, controllo e registrazione delle pressioni alle valvole;
- Regolazione e registrazione delle portate alle 3 linee d'impianto, ottenute attraverso 2 letture dirette mediante Vortex in linea e l'altra gestita indirettamente dal DCS per differenza;
- Gestione allarme e blocco alimentazione ottenuto mediante naso di rilevazione LEL e segnale IN/OUT gestito da centralina, di fornitura ENEA.

Sono stati e test sperimentali con una miscela di gas avente composizione CH_4 60%vol e per il resto CO_2. I test sono stati condotti fissando la portata di alimentazione pari a 40 kg/h e facendo variare la pressione in inlet al modulo polimerico nel range 5-30 barg mediante una rampa di pressurizzazione a partire da 5 barg e aumentando di 5 bar per ciascun test sperimentale.

Per quanto attiene più in generale lo sviluppo di processi per la produzione di biometano da biogas, nella presente annualità si è valutata la possibilità, attraverso simulazioni numeriche, condotte sulla base dei risultati sperimentali, di massimizzare purezza e recupero in metano attraverso l'impiego di un doppio stadio separativo con una compressione del permeato in uscita dal primo stadio previo invio ad un secondo stadio separativo al fine di ottenere un permeato dal secondo stadio, povero in metano e ricircolare il biometano prodotto al secondo stadio nella corrente di alimentazione di processo come mostrato in Figura 107.

La figura mostra la configurazioni impiantistica detta a "tandem", nella quale si è supposti di alimentare il feed biogas, tag 101, con una miscela preventivamente compressa alla pressione di 31 bar. In questa configurazione la miscela di biogas, prima di essere compressa viene miscelata con la corrente di biometano proveniente dal secondo stadio separativo, pertanto a pressione più elevata di quella atmosferica. In questo modo si riesce ad avere una maggiore performance al primo stadio finalizzata alla massimizzazione della purezza, mentre il secondo stadio è finalizzato alla massimizzazione del recupero.

Secondo questa configurazione è possibile ottenere, fissate le stesse condizioni di alimentazione al processo, una produzione in biometano nettamente superiore rispetto alla configurazione a singolo stadio, con una purezza pari a circa il 94%. Tra l'altro in questo modo si riesce a concentrare la CO_2 a valori superiori all'80% vol, e pertanto si presta bene anche per finalità diverse dalla produzione di biometano, come ad esempio il confinamento CCS.

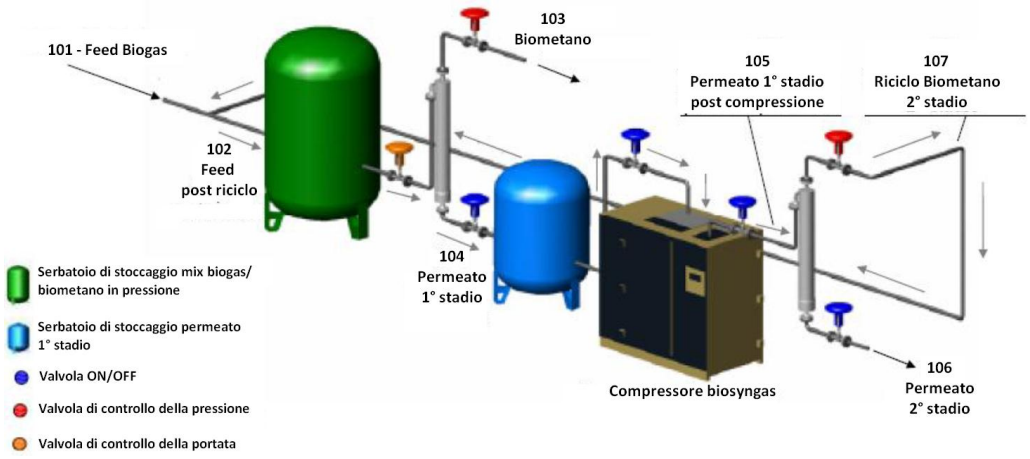


Figura 107. Doppio stadio separativo in configurazione a "tandem"

Questa configurazione impiantistica comporta però un ulteriore aggravio del consumo di energia elettrica dettato dalla compressione intermedia del permeato al primo stadio, pari a circa 3,95 kWh che si sommano ai 6,28 kWh per la compressione iniziale del biogas, per un totale di 10,23 kWh. Ciononostante, l'energia elettrica necessaria al processo risulta pari a 0,82 kWh/kg CH_4, che è circa la metà di quella necessaria con il singolo stadio.

Un ulteriore miglioramento del processo è possibile, sempre nell'ambito del doppio stadio separativo, alimentando al secondo stadio il retentato ottenibile dal primo stadio e riflussando all'ingresso del processo, previa compressione, il permeato del secondo stadio separativo, come mostrato in Figura 108.

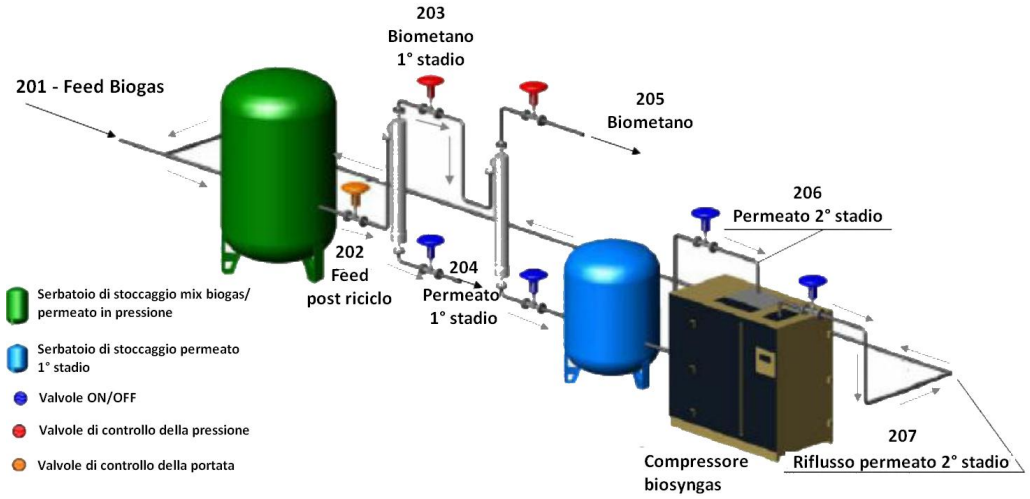


Figura 108. Configurazione di processo con il doppio stadio separativo a "cascata

La figura mostra come, a differenza della configurazione a tandem, lo stadio di compressione viene effettuato a valle del doppio stadio separativo in serie con un riflusso del permeato, ancora ricco in metano in ingresso al primo stadio separativo. I risultati sperimentali hanno mostrato che, attraverso la serie dei due moduli e il riflusso del permeato in ingresso al feed di alimentazione, si ottiene una produttività complessiva più bassa rispetto alla configurazione a tandem, con una portata in metano prodotto pari a 10,56 kg/h.

Tuttavia l'energia necessaria per la compressione della sola aliquota di permeato all'uscita del secondo stadio è pari a 1,44 kWh, circa 1/3 di quella intermedia nella configurazione tandem, per un totale elettrico richiesto pari a 7,72 kWh, a cui corrisponde in termini specifici relativi alla produzione di biometano 0,73 kWh/kg, ottenendo anche in questo caso un recupero in metano superiore all'80%.

Volendo portare a confronto sia in termini energetici che economici i costi di esercizio legati al processo di upgrading del biogas, tralasciando i costi relativi alla depurazione, si ottiene quanto riportato in Tabella 13.

Tabella 13. Comparazione energetica ed economica tra le differenti configurazioni impiantistiche

Configurazione impiantistica	Energia di compressione per l'upgrading	Costo di compressione per l'upgrading
Singolo stadio	1,23 kWh/Nm^3	24,71 €cent/Nm^3
Doppio stadio tandem	0,58 kWh/Nm^3	11,64 €cent/Nm^3
Doppio stadio cascata	0,52 kWh/Nm^3	10,37 €cent/Nm^3

La tabella sottolinea l'importanza del doppio stadio per coniugare elevate purezze in metano con tenori di recupero tali da rendere i processi applicabili su scala industriale, inoltre le differenze apprezzabili tra le due configurazioni a doppio stadio sono essenzialmente legate alla produttività in biometano ed all'energia specifica richiesta per l'operazione di compressione. Infatti sebbene la configurazione a cascata sia meno energivora rispetto alla configurazione tandem (0,52 kWh/Nm^3 vs 0,58 kWh/Nm^3), la sua produttività è più bassa rispetto alla configurazione a tandem.

Differenti studi mostrano come il costo di produzione del biogas, inclusa la materia prima, oscilla tra gli 8 e 13 €cent a seconda che si tratti di un impianto di taglia significativa da FORSU o di un piccolo impianto da liquami bovini. Ipotizzando un contenuto volumetrico in CH_4 nel biogas pari al 50%, per produrre 1 Sm^3 di biometano saranno necessari circa 2 Sm^3 di biogas e pertanto il costo totale di produzione del biometano oscillerà nel range di 26-36 €cent/Sm^3, inferiore rispetto agli attuali prezzi di mercato del gas naturale, lasciando comunque un buon margine di fattibilità per la filiera biometano da scarti agricoli o meglio ancora da FORSU.

- *Caratterizzazione di membrane polimeriche commerciali*

Nell'ambito dell'accordo di collaborazione con ENEA relativo alla studio dell'upgrading di biogas, il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali dell'Università di Bologna aveva il compito di indagare le caratteristiche di diverse matrici polimeriche commerciali, al fine di individuare quelle con le migliori proprietà per la separazione di una corrente mista di metano e anidride carbonica, da usare per upgrading di biogas attraverso un processo a membrana [Report RdS/2012/288].

In tal senso, nell'anno di attività in oggetto, l'Università di Bologna in accordo con ENEA, si è posta l'obiettivo di approfondire lo studio dei materiali considerati nel periodo precedente al fine di verificarne le reali potenzialità applicative. Proseguendo quanto fatto in precedenza, dunque, l'attenzione si è concentrate sul Matrimid®, una poliimide commerciale che possiede discrete potenzialità per la separazione anidride carbonica e metano alle basse e medie pressioni, di cui si riporta di seguito la formula di struttura.

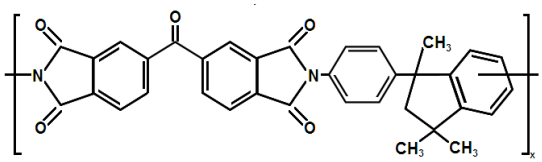


Figura 109. Formula di struttura della Matrimid® 5218

In particolare l'attività si è concentrata sull'analisi delle seguenti tematiche:

- influenza dei diversi protocolli di trattamento sulle caratteristiche delle membrane considerate;
- resistenza all'invecchiamento delle membrane;
- effetto dell'umidità e degli altri composti presenti nella miscela di alimentazione sulle performance di separazione.

La ricerca è stata svolta attraverso una serie di test di permeabilità sul materiale in questione che possono essere così riassunti:

- prove di permeabilità a gas puri (CO_2, CH_4) su membrane sottoposte a pre-trattamenti diversi;
- prove di permeabilità a gas puri delle migliori membrane considerate nella fase precedente, dopo averle sottoposte a protocolli d'invecchiamento controllato o accelerato;
- prove di permeabilità delle membrane di cui ai punti precedenti con gas umidi (CO_2/H_2O, CH_4/H_2O) per valutare l'influenza dell'umidità sulle performance di separazione.

La scelta di approfondire tali aspetti è motivata da alcuni risultati ottenuti nel primo anno di lavoro e, in parte, a nuove informazioni che sono apparse nella letteratura scientifica nello stesso periodo.

In particolare lo studio si è focalizzato sull'analisi dell'effetto di diversi protocolli di preparazione delle membrane, sull'efficienza di separazione delle stesse, sull'eventuale invecchiamento dei materiali con conseguente peggioramento delle loro prestazioni nel tempo e sull'effetto del vapor d'acqua sulla capacità di permeazione degli altri gas.

I risultati ottenuti sono stati di sicuro interesse. Infatti l'analisi di campioni pretrattati a diverse temperature ha permesso di evidenziare come il pretrattamento a bassa T (50 °C) consentisse di aumentare in modo rilevante la permeabilità del film, senza comprometterne la selettività. Purtroppo tali campioni, sicuramente interessanti dal punto di vista di una possibile applicazione, sono risultati anche i più soggetti all'invecchiamento, perdendo fino al 35% della loro capacità di permeazione dopo soli 5 mesi di test.

Anche l'acqua ha mostrato di avere un effetto importante sulla permeazione, provocando riduzioni fino al 40% nel flusso di gas alle più alte umidità testate e aumentando quindi la superficie di membrane necessaria per trattare una determinata quantità di gas.

A fronte di questi risultati apparentemente negativi bisogna però evidenziare il fatto che i diversi trattamenti considerati, così come l'aggiunta di vapor d'acqua, non hanno sostanzialmente modificato la selettività delle membrane. Oltre a ciò, i dati di permeazione di acqua hanno confermato come un polimero come la Matrimid® possa essere utilizzato anche per una parziale disidratazione della corrente di gas da trattare in virtù delle elevate permeabilità al vapor d'acqua misurate.

In generale, però, la Matrimid® non risulta particolarmente interessante per future applicazioni nel campo dell'upgrading del biogas a biometano, avendo proprietà simili se non inferiori ad altri materiali attualmente utilizzati per lo stesso scopo, siano essi proprietari (P84 Polyimide) che liberamente accessibili sul mercato (acetato di cellulosa). Ciò non esclude ovviamente un suo utilizzo in tale campo con moduli a fibre cave ottenibili con questo materiale. E' necessario però sottolineare che da un punto di vista delle applicazioni esistono materiali che, seppure non ancora commerciali, promettono un effettivo salto di qualità per le proprietà e dunque capacità di arricchire il biogas.

In conclusione, pensando ad un'attività futura sembra poco utile continuare lo studio su tale materiale senza considerare almeno la possibilità di studiarne possibili miglioramenti tramite modifiche per via chimica o tramite l'addizione di nanofiller. In tal senso sembrerebbe interessante, dopo aver concluso la caratterizzazione del sistema tal quale con le prove su miscele di biogas, concentrare lo studio sulle possibili modifiche atte a migliorarne le prestazioni del materiale in vista della applicazione considerata. Processi come l'addizione di nanofiller, la miscelazione con sistemi diversi fino ad arrivare alla modifica chimica del sistema sono tutte strade percorribili per tentare l'ottimizzazione del prodotto.

In parallelo, potrebbe essere interessante considerare altri materiali, ancorché non propriamente commerciali, che possano risultare promettenti punti di partenza per la separazione oggetto della ricerca.

- *Sviluppo e caratterizzazione di membrane polimeriche innovative*

L'attività, svolta presso il Dipartimento di Modellistica per l'Ingegneria dell'Università della Calabria, è stata incentrata sullo studio di membrane polimeriche nanocomposite per verificarne l'applicabilità nella purificazione di biogas [Report RdS/2012/289].

L'attività svolta è stata articolata in una prima fase di revisione e messa a punto degli impianti sperimentali in scala da laboratorio, introducendo alcune modifiche nel sistema utilizzato per la sperimentazione con membrane piane. Successivamente, è stata messa a punto la metodologia per preparare le membrane polimeriche nanocomposite piane, da testare sulla cella in scala di laboratorio, individuando le condizioni operative da variare per procedere poi all'ottimizzazione della metodologia di preparazione, sulla base dei risultati ottenuti con le prove di permeazione.

Sono state preparate membrane a base di film polimerici densi isotropici, sviluppate a partire da miscele di un copolimero elastomerico con particolare affinità per la CO_2, e nanofiller inorganici (membrane TPO) in grado di influenzare il trasporto sia da un punto di vista termodinamico sia cinetico. Le membrane polimeriche nanocomposite sono state prodotte miscelando i diversi componenti in soluzione. Soluzioni uniformi e stabili sono state filmate su supporti di vetro, lasciando il solvente evaporare in condizioni di atmosfera controllata (20 °C, 45%) come di seguito schematizzato (Figura 110).

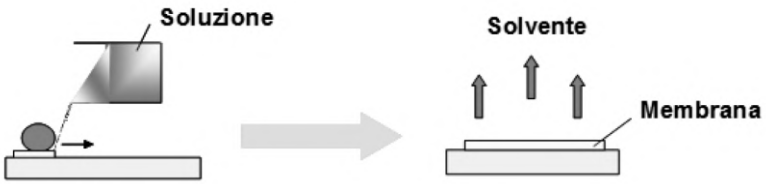


Figura 110. - Filmatura della soluzione polimerica e formazione della membrana per evaporazione del solvente

In seguito all'allontanamento del solvente si è indotta precipitazione del polimero favorendo la formazione di membrane monolitiche dense in configurazione piana e con spessori di circa 70 µm. Al fine di rimuovere tracce di solvente e favorire un maggior compattamento delle catene polimeriche all'interno della matrice, diversi cicli di annealing termico sono stati effettuati sui diversi campioni di membrana.

Analisi morfologico-strutturali sono state effettuate sulle diverse membrane mediante Microscopia a scansione elettronica al fine di valutarne l'uniformità e l'integrità. La Figura 111 mostra un film denso compatto ed uniforme in cui nanoaggregati di filler sono uniformemente dispersi sull'intera area di superficie della membrana. Tutte le membrane appaiono integre e prive di difetti.

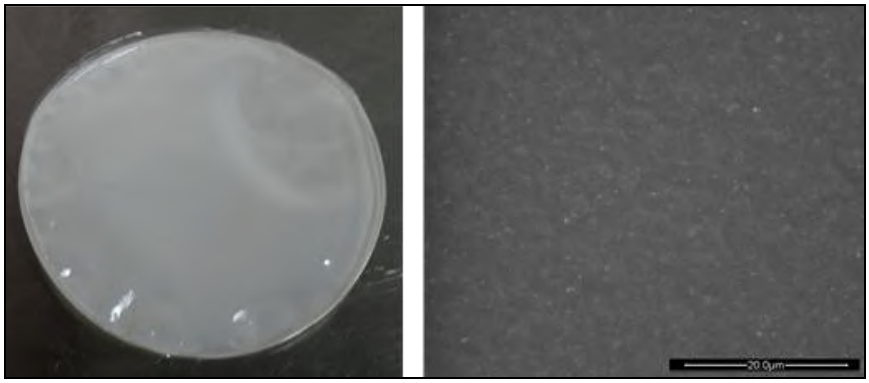


Figura 111. Campione di membrana polimerica nanocomposita. Immagine SEM della superficie ed ingrandimento a 5000X

Sulle membrane preparate come descritto sono stati effettuati test di permeazione a gas puri e miscele nelle seguenti condizioni sperimentali:

- T = ~ 25 °C;
- ΔP transmembrana = 450 - 600 kPa;
- gas puri utilizzati = H_2, CO_2, N_2, CH_4;
- miscele di gas utilizzate = CO_2/CH_4 in rapporto molare 30/70, 40/60, 50/50.

La scelta di utilizzare miscele binarie CO_2/CH_4 a varia concentrazione è una semplificazione di approccio a cui, in futuro, potrà far seguito il testing con miscele di biogas reali.

L'apparato sperimentale utilizzato durante lo svolgimento dei test con membrane piane polimeriche nanocomposite è costituito da una cella in acciaio AISI 316L, atta ad ospitare membrane polimeriche piane, progettata e realizzata nel corso della precedente annualità.

I test effettuati su membrane polimeriche nanocomposite con filler inorganici ha messo in luce come sia importante seguire un protocollo di pre-trattamento (definito con il termine "lavaggio della membrana") mediante l'uso di un gas inerte prima dell'esecuzione delle prove di interesse. Infatti i valori di fattore di separazione (che rappresenta il rapporto tra le concentrazioni di CO_2 e CH_4 nella corrente di permeato e quello nella corrente di retentato) per miscele binarie CO_2/CH_4 restano costanti quanto più rigoroso e prolungato (almeno 4 h di pretrattamento tra una prova sperimentale e quella successiva) è il pretrattamento subito dal campione di membrana.

Un'ulteriore considerazione che si può fare alla luce dei risultati sperimentali è che prove ripetute di permeazione hanno evidenziato una buona stabilità delle membrane TPO, che quindi possono essere utilizzate per il successivo passaggio di scala.

In conclusione, l'attività sperimentale svolta ha mostrato la fattibilità della purificazione del biogas con membrane polimeriche nanocomposite prodotte ad hoc. Le selettività, i fattori di separazione e la stabilità si sono rivelate soddisfacenti. Presumibilmente, un'ulteriore attività di ottimizzazione finalizzata ad individuare la migliore composizione di filler potrà rendersi necessaria in vista di un successivo scale-up allo scopo di verificare la fattibilità su scala pilota del processo.

In quest'ottica, il futuro scale-up dovrà prevedere una modifica della configurazione della membrana, ad esempio passando dalla geometria piana ad una tubolare, al fine di ottimizzare anche il rapporto superficie utile/volume di ingombro.

B.5 Studio delle emissioni di inquinanti da impianti di combustione alimentati a biomasse solide

Presso il Centro ENEA di Saluggia è stato effettuato, in collaborazione con il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia del Politecnico di Torino, uno studio sui sistemi catalitici di trattamento dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse lignocellulosiche allo scopo di individuare i migliori sistemi filtranti e catalitici per la specifica applicazione dell'abbattimento del particolato e/o degli inquinanti organici tipicamente emessi da impianti di combustione di biomasse lignocellulosiche con potenze termiche al focolare di almeno 1 MW [Report RdS/2012/086].

In tali sistemi infatti, seppur caratterizzati da un elevato sviluppo tecnologico e da una provata affidabilità, si riscontrano le note problematiche relative alle emissioni di particolato, idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e composti organici volatili (COV). La riduzione dell'emissione di tali sostanze può essere conseguita innanzi tutto agendo sui sistemi di combustione tramite misure primarie, che hanno l'obiettivo di prevenire, ridurre o contrastare la formazione di inquinanti all'interno della camera di combustione e comprendono azioni volte al miglioramento delle caratteristiche del combustibile in ingresso e all'ottimizzazione della combustione all'interno del generatore di calore, e con una corretta gestione e manutenzione.

Per ridurre ulteriormente i livelli delle sostanze dannose al camino, oltre alle misure primarie è possibile adottare misure secondarie attraverso opportuni sistemi di contenimento e riduzione delle emissioni, che tuttavia hanno un'efficacia solo marginale nel contenimento di emissioni di COV e IPA.

Per questo motivo si vogliono individuare nuovi sistemi di abbattimento basati su processi di rimozione catalitici che consentano di ridurre ulteriormente le concentrazioni di particolato solido e di composti gassosi (IPA e COV) nei fumi al camino.

La combustione di biomasse produce un particolato che contiene un grosso quantitativo di ceneri. La composizione tipica delle ceneri residue è: sali di Na, Mg, K e Ca, sotto forma di solfati, fosfati e cloruri. Considerando questo aspetto e la taglia degli impianti appare estremamente conveniente una preliminare filtrazione dei fumi mediante le tecniche consolidate (filtri a maniche, precipitatori elettrostatici, cicloni, etc.). Una volta eliminata la maggior parte del particolato può essere valutata la possibilità di utilizzare reattori strutturati catalitici per l'abbattimento degli inquinanti gassosi (CO e VOC) emessi ed eventualmente di una quota parte legata alla frazione organica solubile presente nel residuo di particolato non trattenuto dallo stadio di filtrazione preliminare.

Le attività di ricerca hanno portato alla definizione dello stato dell'arte dei dispositivi filtranti e catalitici disponibili in commercio per l'applicazione su impianti cogenerativi di combustione a biomasse lignocellulosiche che siano utilizzabili a valle di sistemi di abbattimento tradizionali e alla definizione di nuove linee di attività che sono state avviate nella presente annualità.

Sono stati elaborati i dati relativi ai parametri caratteristici di funzionamento, alle emissioni al camino e alle caratteristiche chimico-fisiche del particolato emesso in impianti in esercizio sul territorio nazionale rappresentativi delle condizioni di funzionamento effettive dagli impianti oggetto dello studio. In base a questi parametri e alla loro variabilità in funzione delle condizioni operative degli impianti è stata definita una matrice informativa, riportata in forma sintetica nella tabella alla pagina seguente, in grado di fornire una mappa di materiali di supporto e di catalizzatori idonei a trattare le emissioni di particolato e di inquinanti organici in funzione dei parametri di funzionamento degli impianti stessi, quali la temperatura e portata dei fumi, la concentrazione di particolato e la presenza e concentrazione di sostanze che potrebbero danneggiare il catalizzatore.

Si è rilevato che per il trattamento delle emissioni di VOC il metodo di incenerimento catalitico è diventato molto vantaggioso rispetto ad altre tecnologie di abbattimento perché, in molti casi, è più versatile ed economico,

soprattutto nel caso di emissioni a basse concentrazioni (tipicamente <5000 vppm). La temperatura di esercizio e l'eventuale necessità di preriscaldamento del dispositivo variano a seconda della specifica molecola organica da ossidare, della velocità, della composizione del gas da trattare e della concentrazione delle molecole organiche presenti. Tipici esempi di temperature di funzionamento variano indicativamente da 150 a 350 °C.

Il monossido di carbonio è la specie più facilmente ossidabile, per cui l'attenzione è rivolta ad individuare sistemi catalitici efficaci nella rimozione di altre specie organiche, dando per meno problematica la loro efficacia nei confronti del CO.

Una selezione del materiale catalitico per vari inquinanti organici è stata oggetto di molti studi. Sia gli ossidi metallici che i metalli nobili da soli o in combinazione tra loro vengono utilizzati sia per gli idrocarburi clorurati che per gli idrocarburi non clorurati. In generale, i metalli nobili (specialmente platino e/o palladio disperso sui carriers) sono preferiti a causa della loro alta attività catalitica, resistenza alla disattivazione e capacità di essere rigenerati. Il platino sembra essere il catalizzatore preferito per la combustione catalitica degli idrocarburi saturi e per le specie idrocarburiche ad alto peso molecolare, mentre il palladio è preferito per l'abbattimento del metano e delle olefine a basso peso molecolare. Gli ossidi metallici sono meno utilizzati, ma sono più resistenti all'avvelenamento, specialmente da cloro. I più comuni sono basati su ossidi semplici o misti di V, Ce, Mn, Cr, Cu, Co, Ni, W. Catalizzatori contenenti solo vanadio non sono in genere attivi per l'ossidazione completa dei VOC e tendono a produrre prodotti di ossidazione parziale.

Sebbene la ceria sia spesso utilizzata come carrier, è stato anche studiata per l'abbattimento dei VOC. Essa può essere più attiva dei metalli nobili per l'ossidazione di mono-aromatici come il toluene. Sistemi catalitici a base di Mn (perovskiti e MnO_2) sono attivi per l'ossidazione di CO e VOC. La maggior parte della letteratura su catalizzatori a base di cromo mostra quanto siano in particolar modo attivi e resistenti all'avvelenamento per l'ossidazione di organici clorurati. L'ossido di cobalto (Co_3O_4) è stato utilizzato sia come catalizzatore (supportato su Al_2O_3), che come co-catalizzatore (Au supportato su Co_3O_4), per l'ossidazione di CH_2Cl_2.

Tabella 14. Matrice informativa dei materiali di supporto e principi attivi idonei a trattare le emissioni di particolato e di inquinanti organici

	VOC	IPA	CO	PM	Avvelenanti
Honeycomb cordierite/Pt-□-Al_2O_3	Conversione totale a seconda delle specie in un range di T = 150-250 °C	T > 200 °C	Conversione 90% per T > 150 °C	Conversione solo della frazione organica solubile per T di 150-300 °C	Sensibile allo zolfo, al cloro, ceneri e ad alto contenuto di metalli
Honeycomb cordierite/ossidi metallici	Conversione totale a seconda delle specie in un range di T = 150-350 °C	T > 250 °C	Conversione 90% per T > 250°C	Conversione solo della frazione organica solubile per T di 250-400 °C	Ceneri
Wall flow filter SiC/Pt-γ-Al_2O_3	Conversione totale a seconda delle specie in un range di T = 150-250 °C	T > 200 °C	Conversione 90% per T > 150°C	Filtrazione del 99,9% del PM e necessità rigenerazione a T > 400 °C	Sensibile allo zolfo, al cloro, ceneri e ad alto contenuto di metalli. Sinterizzazione durante la rigenerazione se non ben controllata
Wall flow filter SiC/ ossidi metallici	Conversione totale a seconda delle specie in un range di T = 150-350 °C	T > 250 °C	Conversione 90% per T > 250°C	Filtrazione del 99,9% del PM e necessità rigenerazione a T > 500 °C	Ceneri e sinterizzazione durante la rigenerazione se non ben controllata
Monoliti metallici/ catalizzatore	Presentano le stesse caratteristiche degli Honeycomb in cordierite ma hanno un costo notevolmente maggiore senza vantaggi per questa applicazione				

L'utilizzo della catalisi eterogenea per l'abbattimento di inquinanti richiede la deposizione del principio catalitico su un supporto strutturato che venga attraversato dai gas da trattare. I supporti strutturati più diffusi per tale applicazione sono le schiume (foam) e i monoliti a nido d'ape (honeycomb) per via delle basse perdite di carico che comportano rispetto, ad esempio, all'utilizzo di reattori a letto impaccato. Le schiume ceramiche possiedono alcuni vantaggi rispetto ai monoliti a nido d'ape: una più ampia gamma di forme, la natura più tortuosa della porosità che migliora la miscelazione dei reagenti e favorisce le reazioni superficiali nonché il trasporto radiale all'interno del monolita.

La preparazione di schiume ceramiche si basa sull'impregnazione di schiume polimeriche, tipicamente poliuretano, con una sospensione di particelle inorganiche a cui segue un trattamento termico per bruciare il substrato polimerico e sinterizzare le particelle inorganiche. Recentemente è stata sviluppata una procedura significativamente diversa dalla precedente basata su una polimerizzazione in situ di un monomero organico in presenza di acqua, disperdenti, iniziatore catalitico e di polvere ceramica avente una determinata granulometria,

seguita dall'uso di un agente schiumogeno e da un eventuale rivestimento con strati di ossido (wash-coating) su cui poi si deposita il principio catalitico vero e proprio. I principali vantaggi di questa nuova tecnica sembrano essere l'incremento significativo delle proprietà meccaniche prima della calcinazione, consentendo la lavorazione della schiuma prima del trattamento termico e della sinterizzazione, e l'estensione a pori più sottili. In caso di wash-coating si possono avere delle limitazioni della temperatura di utilizzo del materiale.

Ad oggi, le schiume ceramiche più comuni dal punto di vista commerciale contengono allumina, mullite, zirconia, carburo di silicio e silice. Possono essere utilizzate in un largo campo di applicazioni poiché posseggono una combinazione unica di proprietà come ad esempio bassa densità, bassa conducibilità termica, bassa costante dielettrica, bassa massa termica, alta resistenza specifica, alta permeabilità, alta resistenza agli shock termici, alta porosità, alta resistenza alla corrosione chimica. Se però consideriamo l'area geometrica specifica a parità di perdite di carico, le schiume ceramiche presentano valori di un ordine di grandezza inferiori rispetto ai monoliti a nido d'ape. Tale svantaggio e le caratteristiche connesse all'applicazione in impianti per la combustione di biomasse lignocellulosiche richiede un'attenta valutazione della scelta delle schiume ceramiche.

I monoliti a nido d'ape sono costituiti da una serie di canali disposti in strutture parallele o quasi parallele. La forma dei canali può essere differente: circolare, quadrata, triangolare, rettangolare, trapezoidale, esagonale (da cui il nome "nido d'ape"), sinusoidale ecc.. La forma dell'intero blocco monolitico può essere adattata alla camera di reazione. La densità di celle per monoliti ceramici è variabile a seconda del materiale con cui viene realizzato il supporto. Inoltre in alcune applicazioni, monoliti diversi possono essere assemblati in una configurazione con densità di celle variabile lungo l'asse del reattore.

La geometria dei canali influisce sul flusso, come pure sul trasferimento di massa e di calore e, di conseguenza, sulle prestazioni del reattore catalitico. Per questo motivo la geometria migliore dei dispositivi deve essere studiata ad hoc per ogni specifica applicazione.

I monoliti a nido d'ape possono essere di tipo ceramico o metallico, e i supporti strutturati di tipo ceramico possono essere suddivisi in supporti a bassa o alta area superficiale. I supporti ceramici a bassa area superficiale e quelli metallici sono stati sviluppati per il controllo delle emissioni in fase gassosa. In questo ambito, molta enfasi è stata posta sullo sviluppo di supporti strutturati con buone proprietà termiche come l'elevata resistenza agli shock termici, resistenza allo stress termico e refrattarietà.

Per le applicazioni in processi di combustione la cordierite si è dimostrata essere il materiale ceramico più adatto. Supporti strutturati a nido d'ape in cordierite possono infatti essere prodotti con canali di apertura molto piccola (alta densità di celle), pareti molto sottili e ottima robustezza meccanica. La cordierite inoltre presenta un basso coefficiente di dilatazione termica e questo rende il supporto stabile in applicazioni in cui si hanno frequenti variazioni di temperatura, con limitazioni legate al suo basso punto di fusione (1735 K).

I monoliti metallici a nido d'ape sono realizzati in acciaio inox o leghe metalliche particolari. La refrattarietà dei supporti metallici è inferiore rispetto a quella dei ceramici, con massima temperatura di utilizzo di 1670 K contro 2470 K. Al contrario, la conducibilità termica dei monoliti metallici è ben superiore a quello dei ceramici. A causa del maggior grado di vuoto, la massa dei monoliti metallici e la loro capacità termica sono inferiori rispetto ai monoliti ceramici. Pertanto l'innesco di una reazione procede più velocemente con l'adozione di monoliti metallici.

Come per il caso delle schiume ceramiche, anche per i monoliti a nido d'ape è necessario depositare uno strato di materiale ceramico al fine di incrementare l'area superficiale e quindi la possibilità di disperdere meglio il principio catalitico. Le strutture a nido d'ape ceramiche sono prodotte esclusivamente attraverso il processo di estrusione.

Sulla base dei dati di emissione caratteristici delle applicazioni oggetto dello studio (impianti di combustione di biomasse lignocellulosiche con potenze termiche al focolare di almeno 1 MW), le analisi condotte hanno evidenziato che:

- le concentrazioni di monossido di carbonio, anche se generalmente molto inferiori rispetto ai limiti di emissione normativi, potrebbero essere ulteriormente ridotte utilizzando un qualsiasi catalizzatore commerciale a base di Pt-γ-Al_2O_3;
- le concentrazioni di IPA, anche se generalmente molto inferiori rispetto ai limiti di emissione normativi, potrebbero essere ulteriormente ridotte utilizzando catalizzatori a base Pt o ceria con funzionamento ottimale in un range di temperature comprese tra 150 e 250 °C;
- in presenza di diossine e furani (composti organici clorurati) e di acido cloridrico, che si possono formare nel caso in cui legno sia contaminato da cloro e in particolari condizioni operative del generatore di calore, è possibile utilizzare catalizzatori a base Cr più resistenti all'avvelenamento da parte del cloro.

Per quanto attiene al supporto strutturato infine sono da preferire i monoliti ceramici a nido d'ape in quanto meno costosi di quelli metallici e più idonei ad essere catalizzati.

A completamento degli studi fin qui condotti restano da analizzare gli aspetti relativi ad eventuali problematiche di affidabilità e perdite di efficienza di abbattimento, prevedendo anche campagne di prove sperimentali su impianti cogenerativi alimentati a cippato.

- *Apparato per le prove sperimentali di combustione e test dei supporti ceramici per i sistemi di abbattimento delle emissioni*

Nell'ambito della presente annualità dell'AdP, la cobeneficiaria FN S.p.A. aveva il compito di realizzare una prima serie di campioni di supporti ceramici porosi da attivare con catalizzatori, al fine di rimuovere prevalentemente le sostanze inquinanti di natura organica presenti nei fumi di combustione di impianti a biomassa.

Per verificare il comportamento di tali prototipi a contatto con i fumi di combustione, sono state effettuate presso la Hall Tecnologica THEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia delle prove di combustione in caldaia, durante le quali una portata campionaria dei fumi è stata prelevata dal condotto fumario principale e convogliata attraverso una linea secondaria di campionamento, lungo la quale sono stati disposti i dispositivi ceramici da testare [Report RdS/2012/295].

I parametri di emissione della caldaia sono stati misurati lungo lo stesso condotto fumario e a valle della linea di campionamento, a sua volta adoperata alternativamente con o senza i campioni ceramici al suo interno.

Figura 112. Caldaia a biomassa per prove sperimentali presso il Centro ENEA di Saluggia

Dalle osservazioni di carattere fluidodinamico condotte sui prototipi esaminati, e dal confronto dei valori di emissione ricavati nelle varie condizioni di esercizio dell'apparato sperimentale, è stato possibile fornire delle prime indicazioni riguardo l'eventuale impiego dei componenti ceramici in sistemi di rimozione catalitica degli inquinanti, con particolare riferimento alla loro configurazione geometrica.

L'impianto termico utilizzato per le prove sperimentali è una caldaia a combustibili solidi della ditta D'Alessandro Termomeccanica S.p.A., modello CSI 20, mostrata in Figura 112.

Il combustibile viene alimentato dalla tramoggia di carico alla camera di combustione attraverso un doppio sistema di coclee e una valvola rotante. Quest'ultima è inserita tra i due organi di trasporto al fine di migliorare il dosaggio del materiale e per isolare il serbatoio da possibili ritorni di fiamma o da flussi inversi dei fumi di combustione. Le coclee e la valvola rotante sono collegate tra loro attraverso un sistema di trasmissione a catena, il quale è a sua volta collegato ad un motore elettrico mediante un riduttore di giri.

Nonostante la caldaia utilizzata per l'analisi sperimentale sia indicata dalla ditta costruttrice come un impianto a biomassa multicombustibile, le prove di combustione sono state condotte esclusivamente con pellet di legno.

L'impianto ha infatti mostrato problemi di inceppamento del dispositivo di alimentazione del combustibile se alimentato a cippato, mentre non è risultato adatto a bruciare materiale relativamente leggero (ad esempio lolla di riso) in quanto l'aria immessa in camera di combustione determina la fuoriuscita del combustibile dal braciere, in virtù della particolare conformazione degli iniettori.

I fumi di combustione in uscita dalla caldaia attraversano un condotto fumario in acciaio, costituito da un primo segmento verticale non coibentato (di = 150 mm, L = 525 mm), e da un secondo tratto coibentato, posto in posizione orizzontale per una lunghezza pari a circa 2850 mm (di = 150 mm, de = 190 mm). Lungo tale condotto, ad una distanza di circa 2800 mm dallo scarico della caldaia, una portata campionaria di fumi è prelevata in condizioni isocinetiche ed aspirata all'interno di una colonna d'acciaio, la cui lunghezza è circa pari a 1130 mm.

La stessa colonna è inserita per una lunghezza di 700 mm in un forno tubolare, che ne riscalda quindi la parte centrale. Quest'ultima è costituita da un porta cestello, anch'esso in acciaio, all'interno del quale sono disposti i supporti ceramici da testare. Ai due estremi della colonna, all'esterno del forno tubolare, sono disposti i punti di misurazione delle perdite di carico, relative quindi al sistema di derivazione dei fumi e ai componenti ceramici al suo interno.

In uscita dalla colonna d'acciaio i fumi di combustione vengono esaminati mediante un analizzatore portatile, capace di misurarne la temperatura e determinare la concentrazione di CO_2, O_2, CO, NO, NO_2, SO_2 ed idrocarburi incombusti.

Nella zona sottostante la colonna è poi disposto un portafiltro in acciaio, all'interno del quale è inserito un filtro in microfibra di vetro per la ritenzione e la misura del particolato nella portata campionaria dei fumi. A valle di tale dispositivo è infine collegato il sistema di aspirazione e di raffreddamento dei gas.

All'interno del condotto fumario principale è inserita una seconda sonda di prelievo (di = 6 mm, L = 75 mm), con la quale i fumi vengono indirizzati direttamente ad altri due analizzatori, utili a misurare in questo caso la concentrazione di CO_2 e O_2. Nella stessa sonda di prelievo è inoltre presente una termocoppia di tipo K, mediante la quale si determina la temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia.

Tutte le misure ricavate direttamente in condotta sono collegate ad un sistema informatico di acquisizione ed elaborazione dati, attraverso il quale è possibile determinare in tempo reale i maggiori parametri di esercizio dell'impianto (potenza, rendimento, portata, velocità, temperature, ecc.), in maniera indipendente rispetto alle operazioni di verifica sperimentale dei supporti ceramici.

- *Caratteristiche dei supporti ceramici*

I prototipi dei supporti ceramici realizzati da FN S.p.A. [Report RdS/2012/292] sono costituiti da un insieme di elementi cilindrici cavi, ciascuno dei quali ha un'altezza pari a circa 34 mm, un diametro esterno all'incirca uguale a 6 - 8 mm, e uno spessore variabile tra 0,5 e 1 mm. Il materiale di cui sono formati tali elementi è Allumina (Al_2O_3) in polvere. Essi vengono realizzati mediante formatura (colatura su nastro) e sinterizzazione fino alla temperatura di 1500 °C.

Ne consegue una porosità compresa tra 34% e 39% (pori aperti) e una dimensione media dei pori di circa 0,46 μm. Il peso di ogni singolo elemento è mediamente compreso tra 1,20 e 1,25 grammi.

La geometria dei supporti è stata scelta nella sua fase prototipale in base alle capacità realizzative di FN S.p.A. (forma cilindrica), alla disponibilità di un'adeguata cella di contenimento (cestello in acciaio) e al fine di riprodurre la struttura a nido d'ape dei filtri catalitici già disponibili in commercio per impianti termici di piccola taglia.

I cilindri ceramici sono disposti in posizione verticale ed affiancati uno all'altro all'interno di un cestello di acciaio, in maniera da acquisire una configurazione a "tamburo" rispetto al flusso di gas che li attraversa in senso longitudinale.

Il numero di elementi inseriti all'interno del cestello è pari a 10, a cui corrisponde, date le dimensioni del cestello e degli elementi stessi, un grado di vuoto medio della sezione di passaggio dei fumi pari al 77%. La superficie laterale totale dei supporti così formati è invece pari a circa 150 cm^2.

Il cestello di acciaio contenente gli elementi cilindrici è inserito in un porta cestello dello stesso materiale, a sua volta connesso ai restanti elementi tubolari della colonna riscaldata attraverso la quale fluisce la portata campionaria dei fumi di combustione.

- *Verifiche sperimentali sui supporti ceramici*

I supporti ceramici realizzati da FN sono stati testati sull'apparato sperimentale dell'ENEA di Saluggia [Report RdS/2012/295] per evidenziare i possibili effetti di ritenzione del particolato da parte degli stessi supporti e gli eventuali fenomeni di intasamento ed investigare la loro capacità di abbattimento delle sostanze inquinanti (in particolar modo CO e particolato) già a temperature relativamente basse (150 - 200 °C).

Tutte le prove inerenti la verifica dei supporti ceramici sono state effettuate nelle stesse seguenti condizioni di esercizio:

- portata di combustibile pari a 4,93 kg/h, corrispondente a 20 kW di potenza termica erogata;
- concentrazione di O_2 nei fumi di combustione compresa tra 9% e 11%;
- tiraggio dei fumi pari a 20 Pa.

Le diverse serie di test effettuate differivano quindi per la sola temperatura di settaggio del forno tubolare, rispettivamente regolata su valori di 700 °C, 600 °C, 500 °C e 400 °C.

Mediante tale impostazione si è cercato di valutare gli effetti della condensazione dell'umidità e degli idrocarburi pesanti presenti nei fumi sulla capacità di ritenzione dei supporti, oltre che sulle misure di particolato eseguite a valle.

In virtù delle condizioni costanti di esercizio e grazie al mantenimento della portata isocinetica di prelievo, la velocità spaziale del sistema esaminato si è mantenuta su valori pressoché costanti, la cui media su tutte le prove è pari a 66.675 h^{-1}. La velocità superficiale dei fumi (a tubo vuoto) in corrispondenza dei supporti ceramici è risultata invece compresa tra 0,21 e 0,24 m/s.

Come era prevedibile, data la geometria del sistema, le prove sperimentali hanno dimostrato un'inconsistente rischio di intasamento dei supporti da parte del particolato solido, ma anche una distribuzione del flusso attraverso la sezione di passaggio dei fumi piuttosto irregolare, con l'instaurarsi di canali preferenziali per i quali buona parte della superficie degli elementi ceramici è interessata solo marginalmente dal contatto coi gas.

Oltre a dover ovviamente ridefinire i maggiori parametri di dimensionamento (velocità spaziale e velocità superficiale del gas) in base al particolare catalizzatore che si intenderà utilizzare nel prosieguo dell'attività, da questo primo set di prove è quindi ragionevole dedurre la necessità di cambiare o modificare la geometria dei supporti, in maniera da uniformare maggiormente il flusso e migliorare il contatto tra solido e gas.

Per quanto riguarda invece la capacità di abbattimento degli inquinanti organici e del particolato, le misure di concentrazione non hanno evidenziato differenze significative tra i valori ricavati in presenza dei dispositivi ceramici all'interno della linea di campionamento, e i dati ottenuti in assenza di essi.

Oltre che per l'assenza dei composti ad azione catalitica sulla superficie dei supporti, il mancato effetto sulla composizione dei fumi potrebbe essere attribuito anche ai seguenti ulteriori motivi (o una combinazione di essi):

- bassi valori di temperatura nella sezione di campionamento;
- insufficiente qualità del contatto tra i fumi e gli elementi ceramici;
- scarso tempo di residenza dei gas all'interno dei dispositivi porosi.

Sarà quindi necessario, nel prossimo futuro, verificare l'eventuale reattività dei supporti - o la sua totale assenza - su elementi di forma diversa e assemblati in un sistema più "compatto", passando poi alla sperimentazione di diverse combinazioni supporto - catalizzatore per individuare quella, quelle, più promettenti per un successivo scale-up.

C. Analisi di sistemi di generazione/cogenerazione basati su biomasse

Nel corso delle precedenti annualità, l'ENEA, in collaborazione con il Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamenti Ambientali dell'Università di Napoli Federico II (DETEC), ha sviluppato la piattaforma Web A.I.D.A. (Advanced and Innovative tool for Developing feasibility Analysis of biomass plants), che implementa uno strumento di calcolo in grado di analizzare alcune tra le filiere bio-energetiche più diffuse nel sistema produttivo nazionale, contestualizzandole dal punto di vista territoriale allo scopo di poterne eseguire un'approfondita valutazione sotto i tre aspetti economico, energetico e ambientale che concorrono a determinarne la sostenibilità globale della valorizzazione energetica delle biomasse e/o rifiuti [Report RdS/2012/300].

La piattaforma Web A.I.D.A. è costituta da:

- interfaccia utente, utilizzata per selezionare e/o inserire i dati di input utili alla simulazione (le biomasse, tipo e quantità nonché le tipologie di processo e di motori per la generazione di energia);
- database;
- funzioni di calcolo per il dimensionamento del processo e degli impianti;
- principali risultati di prestazioni energetiche utili per uno studio di prefattibilità.

Lo scopo principale dell'attività svolta consisteva nel perfezionare ulteriormente lo strumento A.I.D.A., prevalentemente nella direzione del completamento del database di riferimento, del collaudo di tutte le funzionalità implementate, e del trasferimento sul server ENEA dedicato alla piattaforma Web.

La prima fase delle attività ha riguardato sia il compimento di una serie di aggiornamenti e ampliamenti delle informazioni archiviate nel database A.I.D.A., sia una serie di revisioni. In particolare sono state realizzate modifiche ad alcune parti della piattaforma Web tese a migliorare l'uso dello strumento e ad aggiornarlo anche in relazione alle recenti modifiche legislative sulle modalità di erogazione e l'entità degli incentivi per la produzione di elettricità da biomasse.

- *Aggiornamenti della piattaforma Web*

Tabella Elementi Produttivi

La revisione della piattaforma è partita dall'aggiornamento della "Tabella Elementi Produttivi", elaborata durante lo sviluppo di A.I.D.A., sulla scorta delle informazioni raccolte nell'ambito dello studio relativo all'Atlante Italiano delle Biomasse e dello studio del modello di calcolo posto a valle dello stesso.

Sono stati inseriti i valori di produzione media di biomassa e la resa media di biogas per capo zootecnico ottenuti come elaborazione dei dati acquisiti nel corso dell'attività di ricerca. Tali valori sono stati utilizzati per le funzioni implementate nell'imprenditore finanziario (Report RdS/2011/262) che consentono di quantificare la produzione di biogas e di biomassa a partire dalla scelta della tecnologia di trasformazione energetica (MCI, TAG, MCFC) e la percentuale di matrice con la quale si intende alimentare il digestore.

Tabella Gassificatori

Diversamente da quanto avviene per lo studio di fattibilità condotto per impianti a biogas tramite un modello decisionale impostato, lo studio di fattibilità implementato per la gassificazione muove su altri presupposti, e cioè tramite l'interazione di Web database. Prima di giungere a tale soluzione, è stato necessario un attento studio per individuare le variabili fondamentali in gioco e per universalizzare il sistema in funzione delle diverse esigenze. Le variabili in un processo di gassificazione sono molteplici e sinteticamente schematizzabili nelle seguenti:

- composizione chimica e proprietà fisiche del combustibile (pezzatura, contenuto di umidità);
- agente gassificante (tipo, temperatura di ingresso al reattore e velocità del flusso);
- temperatura (o meglio profilo di temperatura) del reattore;
- pressione di esercizio;
- rapporto di equivalenza (per la gassificazione ad aria od ossigeno);
- rapporto vapore/combustibile (per la gassificazione a vapore);
- rapporto di gassificazione (per la gassificazione ad aria o ossigeno e vapore);
- tempo di permanenza del combustibile nel reattore;
- eventuale uso di catalizzatori e relativa composizione e dimensioni;
- tipologia di reattore di gassificazione.

La difficoltà di poter ricreare tutte queste variabili in un modello matematico è stata la motivazione che ha portato A.I.D.A. ad operare mediante un Web database in cui sono state inserite le informazioni inerenti i parametri operativi di funzionamento e di resa energetica del gassificatore, che consentono di poter elaborare studi di prefattibilità, ma soprattutto con il vantaggio di poterli continuamente aggiornare con il progresso tecnologico.

Al fine di raccogliere informazioni sulle caratteristiche di funzionamento e i parametri operativi e tecnologici dei reattori, è stato preliminarmente individuato un elenco di aziende operanti nel settore della gassificazione mediante indagine bibliografica di settore e incontri con esperti ENEA.

Dalle risultanze di tale studio è stato formulato:

1. L'elenco delle aziende individuate che operano nel settore della gassificazione;
2. Il dettaglio informativo da fornire nel servizio Web e quindi da richiedere presso le aziende suddiviso nelle seguenti macrovoci:
    - caratteristiche ed efficienze di gassificazione
    - tipologia della biomassa
    - specifiche syngas
    - caratteristiche sezione cogenerazione
    - aspetti economici.

Alle aziende individuate è stato inviato un apposito modulo di richiesta di informazioni [Report RdS/2012/300].

La fase di raccolta dei dati è stata piuttosto complessa, e lo dimostra il fatto che non tutte le aziende che sono state contattate sia telefonicamente che via e-mail hanno risposto al questionario. In molti casi le indicazioni relative alle specifiche tecnologiche e alle performances indicate dalle aziende si riferiscono ancora a impianti in fase pilota, non operanti a regime.

Di seguito si riportano le informazioni fornite da TFE - Caema Engineering per il modulo da 300 kW, replicabile nelle soluzioni 600 kW, 900 kW, 1200 kW e 1800 kW.

Azienda	TFE - CAEMA ENGINEERING
Modello tecnologia	Gd500
Tipo tecnologia	Letto fisso downdraft
Agente gassificante	Aria preriscaldata + arricchimento ad ossigeno
Costo impianto completo, €/kW	---
Costo o&m, % costo investimento	---
Potenza elettrica nominale, kW	300
Potenza elettrica netta,kW	---
Potenza termica cogenerata, kWt	---
Rendimento elettrico, %	26
Ore anno di funzionamento	8000
Biomassa, tipologia	Cippato, Miscanto, Sorgo, etc..
PCI medio, kcal/kg	---
Umidita', %	50-15
Pezzatura, cm	1-8 cm
Consumo specifico, kg/kWhe	1
Consumo sost.secca, kg/h	820
Consumo tal quale, kg/h	960
Ceneri, %	5% arboree , 10% erbacee
Costo biomassa, €/t	---
Produttivita' syngas, Nm^3/kg legno	2,5
PCIsyngas, kcal/Nm^3	1300-1500
%CH_4	2-3
%H_2	18-20
% CO	24-26
%CO_2	8-10
%H_2O	3
%N_2	40

Le informazioni raccolte sono state successivamente validate e attentamente verificate da esperti DETEC ed ENEA, integrandole con quelle riportate in letteratura, riassunte nelle seguenti tabelle (Fonte: CNR).

GASSIFICATORE								
		CAEMA	GUASCOR	BIO&WATT	AGT	CIP	Digas	Flenco
Tecnologia	Tipologia	Letto fisso downdraft	Letto Fluido atmosferico	Letto fisso downdraft	Letto fisso downdraft	Letto fisso downdraft	Distillazione gassificata	ORC+ schema integrato solare
Agente gassificante	Tipologia	Arricchimento in ossigeno	Aria preriscaldata	Aria diretta	Aria diretta	Aria diretta	Assenza di ossigeno	Aria diretta
SPECIFICHE BIOMASSA UTILIZZATA								
Biomassa	Tipologia	Cippato	Cippato, sansa, vinacce	Pioppo SRF	Cippato, Sorgo da fibra	Cippato	Cippato, Pellets, Sansa	Sottoprodotti agricoli e legno da risulta
Umidità	%	40%-20%	40%-10%	45%-10%	40%-10%	20%	<30%	45%-25%
Pezzatura	cm	4-5	8-12	5	1-5	1-5	3	1-5
Consumo specifico	kg/kWhe	1,2	1,1	1	1 cippato 1,5 sorgo	1,2	1	1 cippato 1,6 potature
PCI	kcal/kg	>3500	>3500	>3600	> 3.800	-	-	>3.500
ss%	kg/h	720	850	250	250	480	150	200
tq	kg/h	960	1270	400	390	640	170	320
Ceneri	%	4-6	5	5-10	5% arboree 10% erbacee	0,03	3% inerti	basse

SPECIFICHE SYNGAS ED EFFICIENZE DI GASSIFICAZIONE							
		CAEMA	GUASCOR	BIO&WATT	AGT	CIP	Digas
PCI	kcal/Nm^3	1.500-2.000	1.000-1.200	1.200	1.200	1.300	4.050
Produttività	**Nm^3/kg**	**2,5**		**2-2,4**	**2,4**	**2**	-
Efficienza elettrica	%	25	27,2	27,5	28	25	-
Efficienza totale	%	80	75	-		75	
%CH_4	%	4-5	5	2-3	3,2	nd	32,6
%CO	%	24-26	12-15	15	16,6	11	8,9
%H_2	%	18-20	5-7	10	14	4	27,9
%N2	%	35	50-55	50-55	53,1	54	0,8
%CO_2	%	-	-	15	13,1	-	27,26
%H_2O	%	-	-	-	-	0,03	-

In sostanza, lo studio ha confermato che la gassificazione delle biomasse è ancora una tecnologia poco matura dal punto di vista commerciale.

I punti deboli individuati sono:

- non chiara identificazione delle biomasse utilizzabili come combustibile.
- mancanza di garanzie sulle richieste dei costi di investimento e di manutenzione.
- mancanza di tecnologie ben testate per il generatore e garanzie sulle richieste ed i costi di manutenzione connessi.

Alla luce di queste considerazioni si è deciso di creare una tabella Gassificatori del database A.I.D.A. non di aziende operanti con la tecnologia della gassificazione, bensì di modelli di reattore. Si è scelto dunque di riportare solo un campione di reattori selezionato tra le tecnologie più consolidate.

I dati operativi e gli indicatori di prestazione del gassificatore sono resi disponibili nel corso delle simulazioni numeriche, in funzione della scelta della potenza desiderata e successivamente elaborati nelle sezioni energetiche economiche ed ambientali.

- *Modifiche della piattaforma Web*

Al fine di esaminare la potenzialità del modello A.I.D.A. sono stati realizzati incontri tecnici tra DETEC e ENEA nel corso dei quali sono stati vagliati i possibili miglioramenti delle singole unità del sistema da apportare prima del trasferimento della piattaforma Web sul server ENEA.

Le risultanze degli incontri hanno determinato una serie di modifiche consistenti in:

- introduzione di una pagina di registrazione;
- controllo delle schermate Web per garantire un uso più immediato da parte dell'utente finale;
- rimodulazione dell'analisi energetica in grado di rendere più utili le informazioni sull'utilizzo dell'energia termica;
- adeguamento alle novità legislative in materia di incentivi sull'adozione di fonti rinnovabili.

Registrazione alla piattaforma Web

E' stata inserita una schermata per la registrazione dei dati personali prima della visualizzazione del servizio A.I.D.A. al fine di monitorare gli accessi.

In particolare, si chiede all'utente di inserire il nome, cognome, indirizzo mail, Comune e Regione di appartenenza e infine di scegliere il settore di provenienza (Università, Centri di Ricerca, Pubblica Amministrazione, Professionista, Imprenditore agricolo, Imprenditore energetico, Altro…) al fine di elaborare delle statistiche dei visitatori e capire il bacino di utenza potenzialmente interessato al servizio Web.

In quest'ultima versione di A.I.D.A. è stata creata una nuova pagina per la consultazione di documentazione informativa scaricabile in formato pdf con la caratteristica di poterla sempre visionare anche senza aver effettuato la registrazione al sito.

E' stato inserito sul lato destro delle pagine un glossario con il significato dei termini tecnici e degli acronimi utilizzati al fine di facilitare la comprensione. Inoltre alla fine di ogni pagina è data la possibilità di memorizzare sul proprio pc la pagina Web per non perdere il lavoro svolto e per ricostruire il flusso dei dati al termine delle elaborazioni.

Nei tre percorsi del servizio Web identificati con Pubblica Amministrazione, Imprenditore Finanziario e Azienda Agricola sono state revisionate tutte le schermate nella direzione della semplificazione e precisazione delle informazioni trasmesse a video. Nel caso particolare della Pubblica Amministrazione si è deciso di rendere disponibili all'utente solo i dati omogenei dal punto di vista territoriale cioè solo con dettaglio comunale e non provinciale al fine di rendere le elaborazioni più rispondenti alla realtà locale.

E' stata inoltre evidenziata una funzionalità del servizio Web di "Ricerca avanzata", importante per delle considerazioni più di dettaglio che nella precedente versione risultava poco intuitiva ed esplicita. In quest'ottica sono state semplificate le schermate di DEFINIZIONE SUBSTRATO E SPECIFICHE DI PROCESSO E DI IMPIANTO con l'eliminazione della sezioni di accesso degli amministratori di sistema con la password privacy e fornite invece a video delle indicazioni utili alla comprensione della logica del programma.

Analisi energetica: gestione dell'energia termica

Diversamente da quanto implementato durante la scorsa annualità, si è proceduto a una specificazione sull'autoconsumo termico connesso alla produzione di energia termica da cogenerazione. Si è preferito esprimere tutti i termini energetici in potenza al fine di rendere più fruibili gli output del sistema.

In precedenza si fissava una percentuale di autoconsumo dell'energia termica, in questa annualità si dà all'utente la possibilità di variarla. Infatti in funzione alla disponibilità di potenza termica generata dall'impianto si chiede all'utente di indicare un valore percentuale della potenza termica che intende sfruttare per i propri scopi, ma non solo di indicare anche per quante ore anno intende utilizzare il sistema di riscaldamento.

Queste informazioni vengono elaborate dal sistema in base al costo del combustibile, restituendo il costo evitato per la bolletta energetica relativa al riscaldamento con caldaia tradizionale. In questo modo il sistema calcola il costo evitato di energia termica basato sulle esigenze dell'utente e nell'analisi economica successiva lo decurta dai costi sostenuti dall'azienda indicandolo come un ricavo.

In Figura 113 si riporta di seguito un esempio di schermata relativa alla gestione dell'energia termica prodotta da un impianto di biogas.

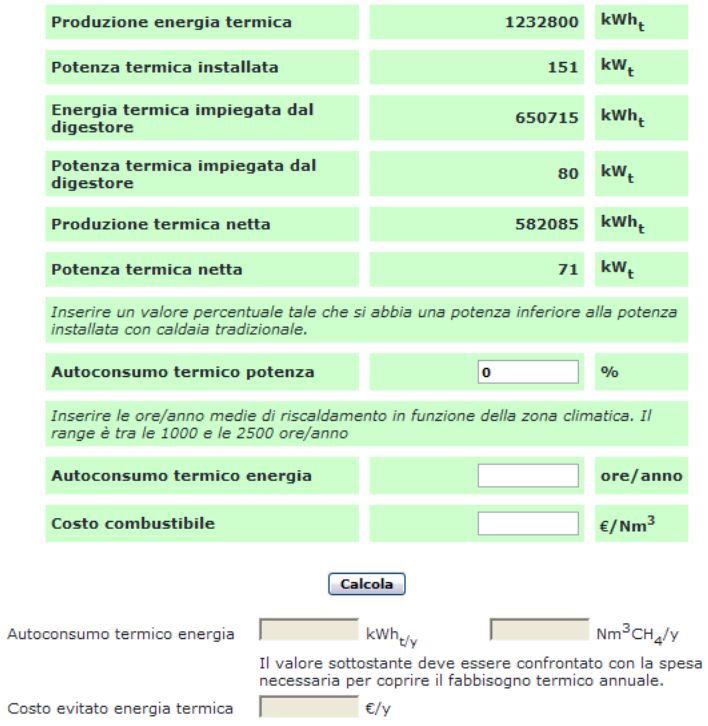


Figura 113. Schermata relativa alla gestione dell'energia termica prodotta da un impianto di biogas

Analisi economica: incentivazione dell'energia elettrica

A seguito delle ultime novità legislative, gli impianti a biomassa che generano energia elettrica possono accedere a forme di incentivazione, diversificate per taglia e tipologia di biomassa, così come fissate dal decreto del Ministero dello Sviluppo economico 6 luglio 2012.

Su richiesta del produttore, per gli impianti entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2012, un impianto a biogas rientrante nella taglia di potenza 0-1 MW accede ad una tariffa omnicomprensiva (TO), gli impianti rientranti nella taglia 1-5 MW hanno invece accesso ad una feed in tariffa legata ai prezzi zonali dell'energia. L'utente, sulla base delle tabelle ministeriali, deve selezionare e riportare nel form sotto riportato il valore del proprio incentivo sulla base del quale il sistema calcolerà poi i benefici economici.

Indicare la tariffa incentivante	0	€/kWh
Indicare i costi di smaltimento reflui sostenuti dall'azienda	0	€/anno
Indicare i "costi di smaltimento/spandimento" del digestato	0	€/t

Figura 114. Form di inserimento del valore dell'incentivo

Il nuovo decreto, fissa la durata degli incentivi a 20 anni, per cui sono stati aggiornati i ricavi economici precedentemente valutati a 15 anni, e inoltre introduce una premialità legata alla cogenerazione ad alto rendimento e, per gli impianti di biogas, all'introduzione di sistemi di abbattimento dell'azoto nel digestato prodotto.

Analisi ambientale: digestato e normativa nitrati

Come è noto, alla fine del processo di digestione anaerobica si ottiene il digestato, un prodotto di composizione e consistenza variabili in funzione dei substrati in entrata e delle modalità di conduzione dell'impianto. Il quantitativo di azoto nel digestato è funzione di quello presente nei substrati di partenza: l'azoto totale rimane invariato lungo il processo di digestione, subendo solo una trasformazione chimica (mineralizzazione), e da azoto prevalentemente organico nelle biomasse di origine diventa in larga parte azoto ammoniacale, forma prontamente assimilabile dalle colture.

Per questo motivo è stato inserito nel software il calcolo della produzione di digestato, dell'azoto presente nel digestato e, qualora sia previsto un trattamento dell'azoto, si stima un ulteriore costo di installazione del sistema per il trattamento del digestato e di abbattimento del contenuto di azoto organico presente nello stesso.

Più in generale, una volta stabilita la possibilità di impiego agronomico del digestato, il dosaggio deve essere definito in base al contenuto di azoto, nel rispetto dei vincoli stabiliti dalla Direttiva Nitrati (91/676/CEE) e relativi provvedimenti di attuazione: 170 kg di N/ha in Zone Vulnerabili da Nitrati (ZVN); 340 kg di N/ha in Zone Ordinarie (ZO). Diventa quindi estremamente importante, per stabilire la fattibilità di un impianto a biogas, la possibilità di disporre delle superfici necessarie allo spandimento del digestato.

A tale proposito, il sistema calcola le superfici necessarie al fine di ottemperare alla Direttiva Nitrati rispettando i limiti di apporto i azoto nei due casi di realizzazione dell'impianto in zona vulnerabile ai nitrati o in zona ordinaria o, in alternativa, fornisce una risposta affermativa o negativa rispetto alla fattibilità dell'impianto in base alla disponibilità di terreni aziendali ricadenti nelle due tipologie di zone.

- *Trasferimento della piattaforma Web AIDA su server ENEA*

La piattaforma AIDA è stata sviluppata nell'arco temporale di un biennio circa, scritta dinamicamente in linguaggio ASP, HTML e JavaScript avvalendosi di strumenti WYSIWYG, disponendo delle più avanzate tecniche di programmazione su infrastrutture HW basate su Windows 2003 Server, appositamente realizzate e messe in opera. La piattaforma Web A.I.D.A. è stata realizzata sotto forma di struttura Web interattiva, con il seguente schema semplificato di funzionamento:

1. uno o più utenti simultaneamente si connettono alla piattaforma tramite terminali;
2. i terminali inviano la richiesta dati attraverso internet;
3. la richiesta giunge al server in cui risiede A.I.D.A.;
4. il server interroga il database che contiene i dati aziendali, tecnici e dei substrati con i rispettivi parametri ad essi associati, ritornando dei valori;
5. il server effettua i calcoli necessari e rimanda i valori al client attraverso la rete;
6. i risultati vengono mostrati al video nel client che ha effettuato la richiesta;
7. l'utente può visualizzare l'output del processo.

La Figura 115 fornisce una rappresentazione grafica dello schema di funzionamento sopra descritto.

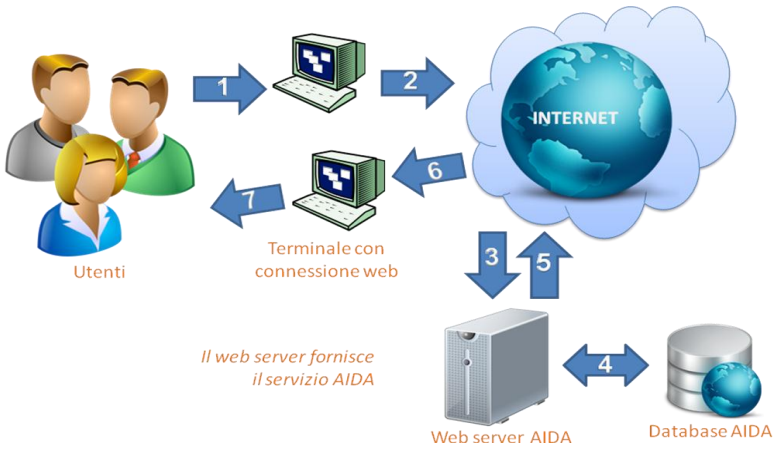


Figura 115. Rappresentazione grafica dello schema di funzionamento della piattaforma AIDA

Struttura della piattaforma

La piattaforma AIDA è costituita da un' infrastruttura Web realizzata in linguaggio ASP dinamico. Una caratteristica molto apprezzata dagli utilizzatori dell'interprete ASP è la semplice e comprensibile sintassi di programmazione che rende la curva di apprendimento di tale linguaggio poco ripida. Funziona ufficialmente solo sul Web server Microsoft Internet Information Services (IIS). Nonostante questo, per quanti utilizzano piattaforme GNU/Linux è disponibile un emulatore che consente di eseguire i codici ASP senza dover riscrivere l'intero progetto ma soltanto una piccola porzione di esso. Nel diffuso Web server Apache, ad esempio, è possibile utilizzare pagine dalla sintassi simile ad ASP installando e configurando il modulo Apache: ASP funzionante sulla base di Perl.

Per alcuni aspetti dinamici come i menù e le interfacce che richiedevano il reperimento di una maggiore quantità di dati dal server si è utilizzata la tecnologia AJAX per rendere più rapida la visualizzazione delle pagine da parte dell'utente. AJAX, acronimo di Asynchronous JavaScript and XML, è una tecnica di sviluppo per la realizzazione di Web applications interattive RIA.

Lo sviluppo di applicazioni HTML con AJAX si basa su uno scambio di dati in background, che consente l'aggiornamento dinamico di una pagina Web senza esplicito ricaricamento da parte dell'utente, fra il Web browser http://it.wikipedia.org/wiki/Web_browser e il server http://it.wikipedia.org/wiki/Web_server.

AJAX è asincrono, nel senso che i dati extra sono richiesti al server e caricati in background senza interferire con il comportamento della pagina esistente. Normalmente le funzioni richiamate sono scritte con il linguaggio JavaScript. Tuttavia, e a dispetto del nome, l'uso di JavaScript e di XML non è obbligatorio, come non è necessario che le richieste di caricamento debbano essere necessariamente asincrone. AJAX è quindi una tecnica multi-piattaforma utilizzabile su molti sistemi operativi, architetture informatiche e browser Web, ed esistono numerose implementazioni OpenSource di librerie e Framework.

Nelle pagine Web della piattaforma è stata utilizzata la tecnica dei fogli di stile (StyleSheet) CSS. L'introduzione del CSS si è resa necessaria per separare i contenuti dalla formattazione e permettere una programmazione più chiara e facile da utilizzare, sia per gli autori delle pagine HTML che per gli utenti.

Ottimizzazione delle strutture dati e realizzazione del pacchetto per l'esportazione

Al termine della fase di realizzazione della piattaforma AIDA si è resa necessaria la messa a punto di una versione del codice universale e trasportabile per renderne possibile la migrazione su un server di pubblicazione. Al fine di rendere più semplice l'esportazione del codice si è quindi proceduto a compattare lo stesso in un pacchetto che è stato successivamente caricato sul server e decompresso nella directory di destinazione. Il database è stato ottimizzato eliminando eventuali ridondanze di dati tramite apposite query e compresso attraverso il comando di compattazione e ripristino database normalmente utilizzato per i database tipo MDB.

Requisiti tecnici del server

La piattaforma Web AIDA è stata sviluppata su sistema Windows 2003 Server SP1 comprensivo di IIS6, programmata con linguaggi quali HTML, JS, SQL, ASP. Per la piattaforma sono stati indicati come requisiti di funzionamento ideali i seguenti:

- Server Web predisposto con sistema operativo Windows 2003 Server e dominio Web di riferimento ad esso collegato;

- Directory con permessi di lettura/scrittura/esecuzione all'interno dello spazio Web (possibilità di impostare i permessi);
- Privilegi per amministrazione server (soprattutto Microsoft IIS e SQL Server);
- Estensioni per linguaggio ASP 2.0 ed estensioni .Net Framework;
- Estensioni FrontPage installate;
- Reperibilità da remoto tramite accesso http/ftp/desktop remoto.

La macchina di sviluppo dell'applicativo è stata approntata con la seguente configurazione:

- Processore Intel Core2 Duo E8400
- RAM installata 4 GB
- Hard Disk 500 GB
- Windows 2003 Small Business Server SP2.
- Accesso remoto HTTP/FTP/RDP

L'ENEA ha di conseguenza fornito la seguente configurazione server:

- Processore Intel Xeon E5345
- RAM installata 4 GB
- Hard Disk 40 GB
- Windows 2008 Enterprise Server R2 (64-bit).
- Accesso remoto HTTP/RDP.

Procedura di configurazione del server

Il server è stato fornito in configurazione "pulita" (configurazione di partenza di Windows Server 2008) con sistema preinstallato e nessun ruolo attivo per il server.

Il server è stato associato all'indirizzo http://aida.casaccia.enea.it/aida/default.asp

Si è proceduto pertanto ad effettuare un'analisi di base delle funzionalità del server per confrontare le versioni Windows 2003 Server e Windows 2008 Server R2, utilizzando il documento rilasciato da Microsoft (http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=11534) per esaminare le differenze tra i due sistemi.

Verificata la possibile compatibilità tra i due sistemi si è proceduto alla configurazione del server come server Web, installando il relativo ruolo ed i servizi associati.

Windows Server 2008 offre una piattaforma unificata per la pubblicazione Web che integra Internet Information Services (IIS), ASP.NET e Windows Communication Foundation. IIS versione 7.0 rappresenta un considerevole miglioramento rispetto al server Web IIS attuale e svolge un ruolo cruciale nell'integrazione delle tecnologie delle piattaforme Web.

Dopo aver configurato il server fornito con il ruolo di Web Server si è proceduto all'installazione di IIS 7.0, dopodiché sono stati copiati i file dell'applicativo A.I.D.A. nella Web root directory di IIS.

La piattaforma A.I.D.A. si compone di 515 file ed un database di tipo MDB. Per il corretto funzionamento dell'applicativo è necessario che la cartella che contiene il DB "mdb-database" sia impostata con i permessi di lettura-scrittura-esecuzione.

Dopo aver effettuato tale procedura si è instaurata la normale connessione via HTTP tramite il dominio Web aida.casaccia.enea.it, che è stato associato dall'ENEA al server fornito, per garantire l'accesso dall'esterno, verificando il corretto funzionamento della piattaforma e delle sue funzionalità.

Il lavoro di trasferimento della piattaforma AIDA è stato quindi completato con successo migrando la stessa da un sistema Windows 2003 server (server di lavoro) ad un sistema più avanzato e performante quale Windows 2008 server R2 (server di pubblicazione). Il server ha fornito prestazioni molto soddisfacenti in fase di collaudo ed è stato quindi confermato come piattaforma ideale per l'applicativo stesso. Non sono risultate necessarie modifiche al codice originale dell'applicativo, riscontrando di conseguenza la piena compatibilità con il sistema di destinazione.

Lo sviluppo del sistema potrà essere arricchito in futuro con nuove funzionalità rivolte soprattutto all'utilizzo della piattaforma da parte dell'utente finale. L'utente può essere dotato di ulteriori strumenti dedicati alla Reportistica per permettere il salvataggio dei dati estrapolati su file di tipo CSV o PDF per permettere ulteriori elaborazioni o l'archiviazione dei risultati per confronti successivi.

Una possibile soluzione potrebbe essere l'implementazione di un'area utente dedicata, creando un substrato di strutture dati, come ad esempio tabelle di data base adatte allo scopo e variabili di sessione, in modo da poter

memorizzare i dati delle elaborazioni effettuate nonché le eventuali preferenze di calcolo e/o visualizzazione delle pagine della piattaforma.

Per quanto riguarda il database aziendale, potranno essere introdotti in futuro altri strumenti di analisi delle potenzialità territoriali, con la possibilità di generare grafici e tabelle per individuare le zone di maggiore o specifica produttività sul territorio. La piattaforma presenta in definitiva una buona possibilità di espandibilità sia sotto l'aspetto del miglioramento della struttura esistente che quello dell'aggiunta di nuove potenzialità.

D. Sviluppo di processi di gassificazione innovativi

L'ENEA conduce da molti anni attività di ricerca e sviluppo tecnologico nel campo della gassificazione delle biomasse, che costituisce in linea di principio un'alternativa valida e promettente alla produzione di elettricità con i sistemi convenzionali basati sulla loro combustione diretta, anche se, allo stato attuale, questa tecnologia non può ancora essere considerata sufficientemente matura, sia per i sistemi di piccola taglia che per quelli di taglia superiore.

La sfida da affrontare è la realizzazione di sistemi di taglia medio-piccola con un livello di affidabilità adeguato e con un grado di automazione che riduca l'impegno di personale, arrivando anche alla possibilità di poter essere gestito con un livello di qualificazione professionale compatibile con la realtà nazionale, senza perdere in efficienza e limitando il costo di trattamento del syngas per l'abbattimento dei contaminanti e/o l'eventuale arricchimento in metano e l'investimento necessario.

Per quel che riguarda in modo più specifico le attività svolte in questo campo nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico, queste sono iniziate nel primo triennio con un'enfasi maggiore sulla ricerca e sviluppo per l'impiego del syngas (e del biogas) in celle a combustibile, con un graduale spostamento dell'attenzione sulla produzione, clean up ed upgrading dei gas derivanti da biomasse o rifiuti organici in sistemi avanzati, sia per migliorare il livello di affidabilità e di compatibilità ambientale di sistemi di conversione esistenti, sia per ampliare e diversificare gli usi finali (sistemi di generazione avanzati, immissioni in pipeline, ecc.).

Di conseguenza, sulla base dei risultati ottenuti in precedenza e di quanto reso disponibile presso l'ENEA anche nell'ambito di altri programmi svolti negli ultimi anni, le attività si sono poste l'obiettivo più generale di migliorare prestazioni e affidabilità dei sistemi di gassificazione delle biomasse disponibili e sviluppare processi di gassificazione innovativi, indirizzandosi in particolare verso i seguenti obiettivi:

D.1 Sviluppo di processi ad elevata efficienza per la valorizzazione energetica di biomasse mediante gassificazione con acqua in condizioni supercritiche.
D.2 Produzione di gas naturale sintetico SNG mediante processo di gassificazione di biomasse con tecnologia a doppio letto fluido ricircolante

Le attività sperimentali sono state svolte presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia, con il supporto del Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali dell'Università della Calabria (per la linea di attività D.1) e dell'Università dell'Aquila (per la linea D.2).

D.1 Sviluppo di processi ad elevata efficienza per la valorizzazione energetica di biomasse mediante gassificazione con acqua in condizioni supercritiche

Le attività relative alla linea D1 sono partite con una valutazione dello stato dell'arte della gassificazione di biomasse in presenza di acqua in condizioni supercritiche (SCWG). L'obiettivo dello studio della letteratura è stato quello di ricavare un quadro completo circa le tecnologie ed i processi che prevedono la gassificazione di biomassa (o substrati modello) in condizioni supercritiche. In particolare l'attenzione verso lo studio è stata rivolta alla cinetica ed ai meccanismi di reazione, alla catalisi, all'influenza sul processo SCW delle condizioni di reazione e, infine, alle difficoltà operative [Report RdS/2012/297].

Il passo successivo è stato la messa a punto di un apparato sperimentale in grado di riprodurre le condizioni operative necessarie per la gassificazione in SCW, mostrato in Figura 116.

Figura 116. Apparato sperimentale per trattamenti idrotermici di biomasse

Allo stato attuale, l'autoclave risulta collegata con un sistema di pompaggio mediante l'ausilio della pompa HPLC, in modo da alimentare

al sistema l'acqua in pressione, e di un particolare sistema di immagazzinamento per l'acquisizione dei gas.

Dopo una prima serie di valutazioni preliminari sul funzionamento dell'impianto, si è passati alla pianificazione e realizzazione di prove sperimentali di trattamenti idrotermici in condizioni subcritiche con biomasse lignocellulosiche e glucosio quale model compound [Report RdS/2012/299]. Quest'ultimo è una molecola semplice, intermedio primario di reazione, e pertanto, rappresenta un composto chiave per lo sviluppo dei meccanismi e l'interpretazione delle cinetiche di reazione.

Trattamenti idrotermici in condizioni subcritiche

Differenti studi mostrano che in condizioni subcritiche i carboidrati contenuti nelle biomasse sono rapidamente idrolizzati in monosaccaridi ed inoltre che il glucosio isomerizza rapidamente in fruttosio secondo lo schema riportato in Figura 117.

Glucosio e fruttosio rappresentano il primo step per lo sviluppo di modelli atti alla comprensione dei meccanismi di reazione. Il fruttosio si degrada rapidamente attraverso reazioni di isomerizzazione, deidratazione, deframmentazione, riarrangiamento e ricombinazione. Lo spettro di prodotti è molto complesso ed include fenoli, furani, acidi ed aldeidi che possono poi convertirsi in prodotti gassosi (in condizioni supercritiche) o liquido/solido (in condizioni subcritiche).

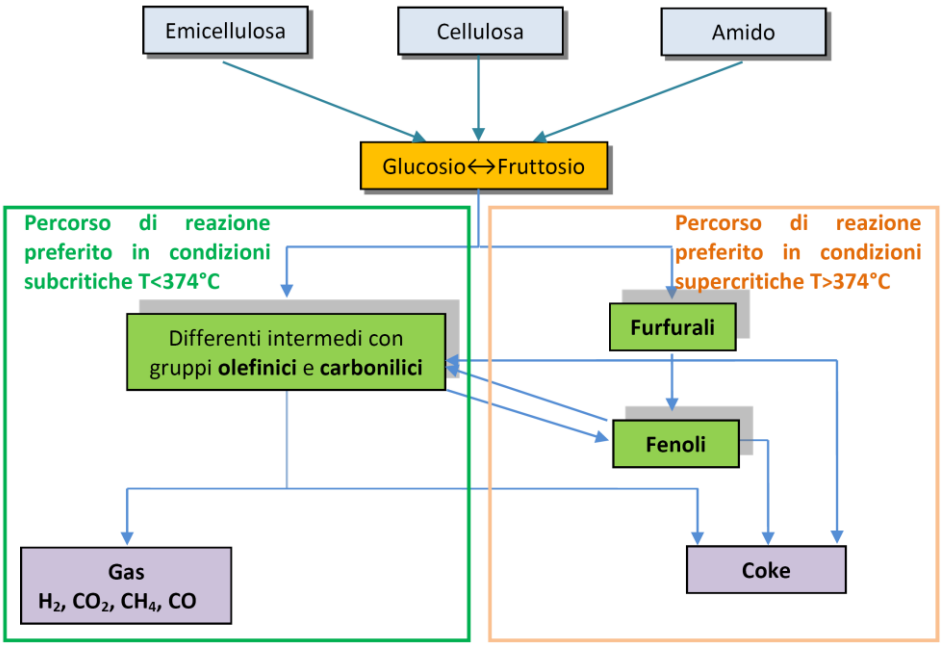


Figura 117. Degradazione dei carboidrati in condizioni subcritiche

Anche la lignina, insieme a cellulosa ed emicellulosa, è tra i principali costituenti delle biomasse; essa è costituita da un etero polimero aromatico con una elevata resistenza alla degradazione chimica ed enzimatica, sebbene durante i processi idrotermici si degrada in diverse tipologie di fenoli.

Risultati sperimentali di processi idrotermici con la lignina, nel range di 350-400 °C, hanno mostrato la formazione di composti quali catecolo, fenoli e cresoli, con una resa in fase liquida nel range 58-79% e nel range 12-37% per la fase solida. La fase liquida ottenuta non è di tipo oleoso, bensì una fase acquosa all'interno della quale sono disciolti composti organici.

I test sperimentali in condizioni subcritiche sono stati condotti alimentando con una soluzione di glucosio al 10%peso il volume dell'autoclave (275 mL fino alla completa pressurizzazione e riscaldamento a 300 °C. Successivamente, mediante l'ausilio della pompa HPLC si è alimentata a 300 bar la stessa soluzione con una portata pari 2-3 mL/min.

I risultati ottenuti in uscita dal processo hanno permesso di verificare una buona corrispondenza sui bilanci di materia rispetto a quanto alimentato nell'intero processo, con una distribuzione fra le diverse fasi riportata nella Figura 118.

Questi risultati sperimentali sono stati validati in altri 2 test ottenendo risultati similari, e risultano essere in accordo con i principali lavori condotti nelle stesse condizioni operative ed utilizzando glucosio come model compound.

Al fine di dare maggiore enfasi al fatto che in condizioni subcritiche, a differenza delle condizioni supercritiche, è ancora molto alta la frazione di solido formatasi dal processo, in Figura 119 si riportano le foto del reattore smontato alla fine della sperimentazione con glucosio.

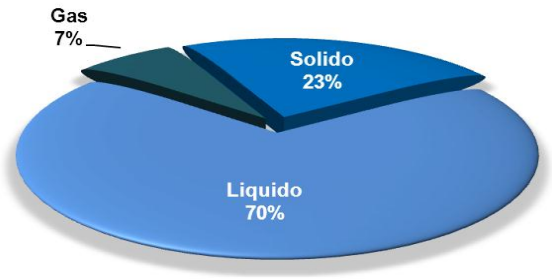


Figura 118. Ripartizione percentuale tra le fasi formatesi durante il processo di gassificazione del glucosio in condizioni sub-critiche

Il gas prodotto dal trattamento idrotermico del glucosio rappresenta una aliquota esigua rispetto agli altri prodotti di reazione; infatti solo l'8% è dato dal gas che peraltro, in linea con la letteratura, presenta un contenuto in anidride carbonica consistente, che in alcuni test è risultata essere anche del 68% in volume.

Figura 119. Foto del reattore smontato a fine test

In Tabella 15 si riporta il range di composizioni del syngas ottenuto nelle differenti prove sperimentali nelle stesse condizioni di processo (300 bar; 300 °C).

Tabella 15. Composizione del syngas ottenuto dalla gassificazione del glucosio in condizioni subcritiche (300 bar; 300 °C)

Specie	H_2	CO_2	CO	CH_4	C_3H_8	C_2H_6
%vol	10-14	53-68	15-20	0-0,4	0,05-0,07	0,05-0,09

L'elevata percentuale volumetrica in anidride carbonica rende il syngas poco attraente per quanto attiene il suo potere calorifico, sebbene l'elevata pressione poterbbe rendere molto meno impattante l'upgrading dello stesso per separazione dell'anidride carbonica. Ad ogni modo il valore aggiunto del processo idrotermico è dato dalla capacità di poter pretrattare biomasse molto umide, consentendo così di poter gassificare in condizioni ordinarie il solido ottenuto dal processo e con la possibilità di poter dare valore aggiunto dalla separazione delle molecole formatesi in fase liquida per la produzione di chemicals.

Il residuo solido carbonioso presente nel reattore è stato raccolto, unito a quello recuperato dalla filtrazione delle soluzioni, seccato a 105 °C e pesato e, allo stato attuale, non sono ancora state effettuate analisi elementari su tali matrici al fine di determinarne la composizione, anche se dal contenuto di carbonio nel glucosio di partenza, inferiore a quello ottenuto in uscita, si può presagire la presenza di gruppi funzionali con ossigeno e idrogeno e quindi molecole più complesse rispetto al solo char. Per quanto attiene alla soluzione liquida raccolta nei condensatori e quella nel reattore si è evidenziata la presenza di molecole di aldeidi e acidi carbossilici tipici dei processi di degradazione termica di zuccheri.

I cromatogrammi ottenuti dalle analisi HPLC della soluzione liquida presentano numerosi picchi corrispondenti ad altrettante molecole di cui non si conosce esattamente la formula. Per poter effettuare una valutazione quantitativa delle molecole generate, non disponendo degli standard analitici necessari, ogni cromatogramma è stato suddiviso in gruppi di molecole che possiedono lo stesso fattore di risposta analitico RF e per i quali si dispone degli standard di riferimento.

Nella Tabella 16 seguente sono riportate per le due soluzioni le concentrazione delle molecole individuate e della somma di quelle identificate con picchi simili a quelli disponibili in libreria.

Tabella 16. Concentrazioni delle specie in soluzione acquosa ottenute dal processo di gassificazione del glucosio in condizioni sub-critiche

Analita	Concentrazione (mg/L	
	Interno autoclave fine prova	Dallo scarico del condensatore
Glucosio	1137,2	680,8
Picco tipo fruttosio	350,0	450,0
Acido lattico	145,4	246,9
Acido formico	93,7	391,1
Acido acetico	392,3	1352,8
Picco tipo etanolo	271,9	621,7
Picco tipo 5-idrossimetilfuraldeide	219,0	320,6
Picco tipo 2-furaldeide	150,1	298,4
Picco tipo 4-idrossibenzaldeide	169,9	603,9
Picco tipo syringaldeide	55,6	932,0

La presenza di specie aldeidiche e furaniche è in pieno accordo con i modelli proposti per i processi idrotermici dei carboidrati, così come mostrato dalla principale letteratura esistente.

Ulteriori prove sperimentali sono state condotte al fine di incrementare la resa dei prodotti gassosi e dell'idrogeno. In particolare studi di letteratura hanno mostrato che la presenza di NaOH all'interno del sistema di reazione catalizza le reazioni idrotermiche, provocando un incremento della resa in gas ed in particolare per l'idrogeno prodotto, perché la presenza di idrossido di sodio partecipa alle reazioni di cattura della CO_2 spostando l'equilibrio della reazione di water gas shift (WSG) a destra come di seguito mostrato:

$$CO_2 + 2\,NaOH \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2O \qquad (1)$$

$$CO_2 + 2\,Na_2CO_3 + H_2O \longrightarrow 2\,NaHCO_3 \qquad (2)$$

Sebbene l'effetto potrebbe sembrare nettamente positivo ai fini della produzione di gas, la presenza di NaOH può portare alla formazione di acetato di sodio e ulteriore CO_2 prodotta, secondo le seguenti reazioni:

$$CH_3COOH + NaHCO_3 \longrightarrow CH_3COONa + H_2O + CO_2 \qquad (3)$$

$$2\,CH_3COOH + Na_2CO_3 \longrightarrow 2\,CH_3COONa + H_2O + CO_2 \qquad (4)$$

Oppure un eccesso di idrossido di sodio può portare alla reazione diretta con l'acido acetico formando acetato di sodio e acqua:

$$CH_3COOH + NaOH \longrightarrow CH_3COONa + H_2O \qquad (5)$$

I test sperimentali in presenza di idrossido di sodio allo 0.5%p hanno permesso di validare tali ipotesi di modello, infatti rispetto alle prove condotte nelle stesse condizioni operative, ma in assenza di idrossido di sodio, la percentuale di gas formatosi è superiore, mentre quella del solido diminuisce considerevolmente, come mostrato in Figura 120.

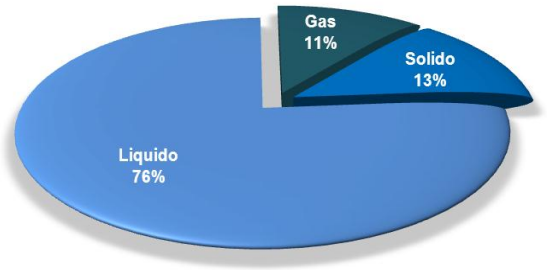


Figura 120. Ripartizione percentuale tra le fasi formatesi durante il processo di gassificazione del glucosio in condizioni sub-critiche (300 bar; 300 °C) con NaOH 0,5%p

I risultati sono inoltre confermati dalle analisi sui gas prodotti che evidenziano un incremento della percentuale volumetrica in idrogeno, nonché dell'anidride carbonica ed una contestuale diminuzione del monossido di carbonio.

Tabella 17. Composizione del syngas ottenuto dalla gassificazione del glucosio in condizioni subcritiche (300 bar; 300 °C) in presenza di NaOH 0,5% peso

Specie	H_2	CO_2	CO	CH_4	C_3H_8	C_2H_6
%vol	14-21	65-75	5-15	1-3	0,15-0,33	0,09-0,13

In Tabella 17 si evidenzia un lieve incremento della concentrazione volumetrica di metano rispetto alle analoghe prove sperimentali in assenza di soda, tale incremento è in accordo con la letteratura e giustificata dalla reazione dell'acetato di sodio con l'idrossido di sodio:

$$CH_3COONa + NaOH \rightarrow CH_4 + Na_2CO_3 \qquad (6)$$

Tale reazione diventa però significativa a temperature più elevate rispetto a quella di 300 °C alla quale sono stati condotti i test in quanto, per tali temperature, è più efficiente la reazione che porta alla decomposizione dell'acetato di sodio.

Tabella 18. Concentrazioni delle specie in soluzione acquosa ottenute dal processo di gassificazione del glucosio in condizioni sub-critiche in presenza di NaOH allo 0,5% peso

Analita	Concentrazione (mg/L)	
	Interno autoclave fine prova	Dallo scarico del condensatore
Glucosio	555,1	375,0
Picco tipo fruttosio	1559,7	1930,0
Acido lattico	5425,0	5550,1
Acido formico	16250,4	15500,0
Acetato di sodio	10630,0	10350,0
Picco tipo etanolo	161,2	101,2
Picco tipo 5-idrossimetilfuraldeide	186,4	245,9
Picco tipo 2-furaldeide	50,9	38,1
Picco tipo 4-idrossibenzaldeide	75,9	108,1
Picco tipo syringaldeide	181,2	182,4

La Tabella 18 mostra una concentrazione inferiore di glucosio rispetto agli stessi test condotti in assenza di soda e questo, insieme alla presenza di acido acetico giustifica i meccanismi di reazione (1-5); inoltre il pH delle soluzioni a fine test, in presenza di catalizzatore in fase omogenea, è stato circa pari a 6-7, a conferma che tutta la soda viene neutralizzata dagli acidi carbonici (e quindi dalla CO_2) in soluzione.

Un ulteriore set di prove è stato condotto alimentando al sistema direttamente una biomassa reale, quale i gusci di mandorle, in condizioni operative analoghe rispetto ai test con il model compound. I risultati della ripartizione tra le fasi ottenute a fine test sono mostrati nella Figura 121.

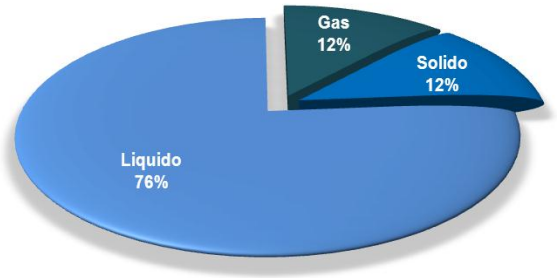


Figura 121. Ripartizione percentuale tra le fasi ottenute al termine del processo di gassificazione della biomassa in condizioni subcritiche

Anche in questo caso, come per il model compound valutato nel paragrafo precedente, il prodotto principale della reazione è un liquido nel quale sono disciolte sostanze organiche. Dall'analisi di queste due matrici acquose, rappresentative della frazione più abbondante formatasi dalla gassificazione in condizioni sub-critiche, si è evidenziata la presenza di molecole di aldeidi e acidi carbossilici tipici dei processi di degradazione termica di zuccheri.

Nella tabella seguente sono riportate per le due soluzioni, quella ottenuta a fine prova all'interno dell'autoclave e quella di recupero dal condensatore, le concentrazione delle molecole identificate con picchi simili a quelli disponibili in libreria.

Tabella 19. Concentrazioni delle specie in soluzione acquosa ottenute dal processo di gassificazione della biomassa selezionata in condizioni sub-critiche

Analita	Concentrazione (mg/L	
	Interno autoclave fine prova	Dallo scarico del condensatore
Glucosio	31,2	10,8
Xilosio	74,4	45
Acido lattico	216,1	80,4
Acido formico	503,3	34519
Acido acetico	10185,7	6371,2
Glicerolo	119,1	81,8
Picco tipo etanolo	338,8	142,8
Picco tipo 5-idrossimetilfuraldede	75,1	103,2
Picco tipo 2-furaldeide	57,7	114,6
Picco tipo 4-idrossibenzaldeide	731,3	884,2
Picco tipo syringaldeide	1041,9	2950,6

La Tabella 19 mostra la presenza di glucosio all'interno del sistema di alimentazione, a conferma del fatto che esso può rappresentare l'intermedio principale delle reazioni di gassificazione in condizioni idrotermiche, sebbene la sua presenza in concentrazioni inferiori rispetto alla prova condotta con glucosio lascia intendere che l'effetto dei metalli contenuti nelle ceneri catalizza la reazione di gassificazione, e questo è confermato peraltro da un minore contenuto di solido totale ottenuto a fine prova e da un maggiore quantitativo in fase gas, sebbene prove dedicate in questa direzione siano necessarie per la comprensione della fenomenologia.

Di seguito si riporta il range di composizioni per i diversi gas presenti in fase gassosa ottenute da diverse prove.

Tabella 20. Proprietà del syngas ottenuto dalla gassificazione della biomassa selezionata in condizioni subcritiche (300 bar; 300 °C)

Specie	H_2	CO_2	CO	CH_4	C_3H_8	C_2H_6
%vol	5-10	55-75	5-10	1-3	0-0,05	0-0,06

Rispetto alle prove condotte con glucosio si evidenzia una percentuale maggiore di anidride carbonica e di metano nel syngas, a fronte di una marcata riduzione del contenuto di monossido di carbonio e di idrogeno. Le stesse prove sperimentali condotte in presenza dello 0.5% wt di idrossido di sodio hanno permesso di confermare la propensione dello stesso quale catalizzatore, nonché sequestratore di anidride carbonica. Infatti la percentuale

ottenuta a fine prova è risultata essere, in media, pari al 19%, contro il 12% ottenuto in sua assenza, come di mostrato in Figura 122.

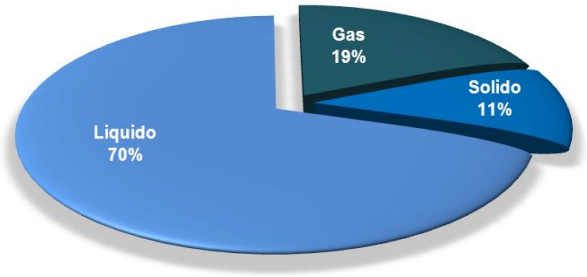


Figura 122. Ripartizione percentuale tra le fasi ottenute al termine del processo di gassificazione della biomassa in condizioni subcritiche in presenza di NaOH allo 0,5%p

Molto importante è il ruolo che assume il catalizzatore in fase omogenea per quanto attiene la tipologia di fase liquida formatasi: il glucosio è presente in soluzione in concentrazione minore (a parità di tempo di prova) e questo è sintomo di un maggior avanzamento delle reazioni idrolitiche, ma anche la presenza di acetato di sodio, viceversa assente quando le prove sono condotte in assenza di catalizzatore, implica l'avanzamento delle reazioni (1-6). I risultati analitici sulle soluzioni liquide contenute nel reattore a fine prova e sulla soluzione liquida ottenuta dal condensatore, sono mostrati nella Tabella 21.

Tabella 21. Concentrazioni delle specie in soluzione acquosa ottenute dal processo di gassificazione della biomassa selezionata in condizioni sub-critiche in presenza di NaOH allo 0,5% peso

Analita	Concentrazione (mg/L	
	Interno autoclave fine prova	Dallo scarico del condensatore
Glucosio	10,6	30,1
Xilosio	27,1	40,0
Picco tipo fruttosio	201,2	303,2
Acido lattico	1595,2	1800,3
Acido formico	5240,1	11400,6
Acetato di sodio	9850,2	17900,2
Picco tipo etanolo	21,0	5,0
Picco tipo 5-idrossimetilfuraldede	270,0	351,2
Picco tipo 2-furaldeide	44,0	70,6
Picco tipo 4-idrossibenzaldeide	96,0	461,4
Picco tipo syringaldeide	250,3	670,9

Per quanto attiene alla qualità del gas, la presenza di idrossido di sodio, nelle condizioni operative di indagine, comporta un incremento relativo di circa il 6-7% vol. per l'idrogeno, così come per l'anidride carbonica, mentre per il monossido di carbonio si riscontrano lievi diminuzioni nella sua percentuale relativa in miscela; inoltre gli idrocarburi paraffinici presenti in fase gas, metano, etano e propano, presentano lievi incrementi nella loro composizione volumetrica.

Tabella 22. Proprietà del syngas ottenuto dalla gassificazione della biomassa selezionata in condizioni subcritiche (300 bar; 300 °C) in presenza dello 0,5% peso

Specie	H_2	CO_2	CO	CH_4	C_3H_8	C_2H_6
%vol	10-17	65-80	3-8	2-4	0,1-0,13	0,1-0,14

In definitiva, i processi idrotermici consentono di poter processare matrici molto umide quali biomasse tal quali, fanghi di digestione, microalghe etc., evitando di doverle preventivamente essiccare. Inoltre, il processo consente di ottenere un gas di sintesi che si trova ad elevate pressioni e, pertanto, non solo si presta bene ad operazioni di recupero energetico per espansione, ma, soprattutto, permette di ottenere sostituti del gas naturale a pressioni

idonee all'immissione nella rete nazionale di distribuzione, mentre le operazioni di assorbimento della CO_2 risultano facilitate dalle condizioni operative.

Le condizioni operative dei processi idrotermici sono tali da formare soluzioni liquide che contengono composti organici per oltre il 70% peso rispetto all'alimentato e pertanto possono avere una valenza non solo per il pretrattamento del solido, ma soprattutto per ottenere soluzioni acquose che contengono costituenti fondamentali, intermedi o materie prime, che hanno valenza economica nell'industria chimica, quali i furfurali, che possono rappresentare un importante intermedio utilizzabile per la chimica agraria o per la produzione della Lycra(PoliTHF). Inoltre, nell'ambito della produzione di polimeri speciali, i furfurali possono essere utilizzati nella sintesi del acido furandicarbossilico che può sostituire l'acido tereftalico utilizzato come monomero nella produzione del polietilentereftalato(PET) o infine come intermedio ad alto valore aggiunto per la chimica fine ed in particolare nella sintesi degli alchilfluorurati.

Variando temperatura e tipologie di catalizzatori è possibile ottenere biofuels liquidi o gassosi e, in quest'ultimo caso, spostare le reazioni verso la produzione di biometano e/o bioidrogeno, con conseguenti vantaggi economici di processo rispetto ai processi convenzionali di pirolisi e gassificazione, sebbene con rese in fase gassosa dell'ordine 8-15% peso rispetto alla matrice di partenza.

La sperimentazione è stata condotta utilizzando come materia prima la biomassa tal quale ed il glucosio quale model compound, permettendo di verificare le ripartizioni relative tra le fasi ottenute dall'upgrading idrotermico di tali matrici, la qualità e la composizione del syngas, nonché la qualificazione della matrice liquida ottenuta, con l'identificazione delle principali specie che possono avere elevato valore aggiunto nell'industria chimica come sostituti di prodotti di sintesi.

Molte sono ancora le criticità per un sviluppo su più ampia scala, tra questi i più importanti sono l'alimentazione, la carica di solido, il trasferimento di calore ed il suo recupero, le impurità contenute nelle matrici, la formazione di depositi di solido e la disattivazione dei catalizzatori e l'effetto parete, e pertanto diversi sono ancora gli sforzi da fare nell'ambito della ricerca per sostenere lo sviluppo industriale, anche se le prospettive di sviluppo tecnologico rendono molto attraente il processo sia come processo di pretrattamento finalizzato alla produzione di solido più facilmente gassificabile con le tecnologie attualmente disponibili, ma soprattutto, nell'ambito della qualificazione del residuo liquido contenente intermedi organici di elevato valore per l'industria chimica.

Nel corso della prossima annualità dell'AdP è previsto il passaggio alla sperimentazioni su matrici reali (fanghi di depurazione, alghe, ecc.) in condizioni operative più spinte. A tale scopo, si provvederà a sostituire il riscaldatore del dispositivo utilizzato per le prove sperimentali precedentemente descritte in modo da poter effettuare prove di gassificazione in condizioni supercritiche a temperature fino a 450-500 °C.

- *Produzione e caratterizzazione di catalizzatori metallici per la gassificazione di biomasse con acqua in condizioni supercritiche*

Le attività in oggetto, svolte in stratta collaborazione fra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali dell'Università della Calabria, hanno riguardato essenzialmente la valutazione delle principali caratteristiche dei catalizzatori utili per i processi di gassificazione in condizioni vicino a quelle critiche e supercritiche.

In particolare, è stata dato risalto alle caratteristiche dei catalizzatori bimetallici del tipo Co-Mo e Ni-Mo su γ-Al_2O_3, che hanno mostrato la migliore efficacia nei processi che coinvolgono l'idrogeno, effettuando un'approfondita analisi comparativa delle diverse tecniche di preparazione e caratterizzazione, oltre che delle caratteristiche salienti dei catalizzatori stessi [Report RdS/2012/291].

Nel caso specifico preso in esame, si tratta di catalizzatori bimetallici, in cui gli elementi agiscono da promotori (Co e Ni) e da fase attiva per le reazioni (MoS_2), supportati su γ-Al_2O_3 avente una area superficiale di circa 200-300 m^2/g, prodotti per ripetute impregnazioni, introducendo simultaneamente i due componenti di interesse in forma di composti solubili e con una concentrazione in leggero difetto rispetto a quella necessaria per depositare i relativi ossidi: CoO, NiO, e MoO_3.

Il supporto impregnato è calcinato in aria (400-500 °C) per eliminare l'acqua, oltre a cationi ed anioni presenti nella soluzione (NH_4^+ e NO_3^-). L'uso di tale tecnica consente, nelle produzioni di larga scala, di ridurre i costi di essiccamento conseguenti all'elevato quantitativo di acqua presente.

Il risultato finale sono catalizzatori classicamente etichettati come CoO(NiO)-MoO_3-γ-Al_2O_3, dove la formulazione non implica necessariamente la presenza di ossidi in fase distinta nel catalizzatore. Considerando, ad esempio, l'impregnazione del molibdeno, occorre partire dal fatto che l'allumina in acqua tende a caricarsi elettricamente come molti ossidi ed è stato suggerito che siano proprio le forze elettrostatiche all'interfaccia soluzione-solido a

guidare il meccanismo di impregnazione. Al punto isoelettrico (IEP), coincidente con un pH = 8 per l'allumina, il solido presenta neutralità di carica, mentre per pH inferiori esso è caricato positivamente e viceversa.

La fonte di molibdeno è, in genere, eptamolibdato di ammonio $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$, perché si preferisce la presenza di ioni ammonio NH_4^+ rispetto a quelli alcalini in quanto, nella successiva fase di calcinazione, è più facile la loro decomposizione, mentre la presenza di ioni Na^+ non fornirebbe garanzie rispetto all'adsorbimento, con conseguente modifica delle proprietà superficiali dell'allumina.

Ad elevati valori di pH l'adsorbimento è molto contenuto, mentre un valore di pseudo-plateau si osserva nell'intervallo di pH 2-6. Ulteriori diminuzioni del pH provocano precipitazioni all'interno dei pori producendo precipitati alterati per cui questa zona non è rappresentativa di un equilibrio di adsorbimento. Inoltre esiste una diretta relazione tra la forza dei legami che si instaurano tra supporto e molibdati in funzione del pH, come testimoniato dalla variazione di IEP e quindi delle forze elettrostatiche che governano il fenomeno. Addirittura per pH superiori a 11 il (poco) precipitato può essere rimosso con un semplice lavaggio in acqua.

Attraverso la spettroscopia RAMAN è possibile identificare la natura dei molidbati depositati e seguire l'evoluzione a seguito della calcinazione, che essenzialmente decompone gli ioni ammonio e rafforza i legami degli ossidi di Mo con il supporto. Inoltre l'analisi degli spettri conferma la presenza di complessi di ossidi in predominanza rispetto ai monomeri, in genere con un buon grado di dispersione. Al contrario la presenza di MoO_3 nei pori o la formazione di $Al_2(MoO_4)$ è da evitare in quanto entrambi non sono buoni precursori per la dispersione della fase attiva MoS_2. La presenza dei cristalliti di MoO_3 è rivelabile attraverso XRD mentre la formazione di $Al_2(MoO_4)$ è promossa solo da temperature di calcinazione ampiamente superiori a 500 °C.

Per quanto riguarda Co^{2+} e Ni^{2+} esiste minore certezza in merito alla deposizione. Alcuni studi di dettaglio hanno mostrato che l'allumina non è totalmente inerte anche in condizioni non drastiche di deposizione (temperatura ambiente e pH intorno al IEP).

In ogni caso, la via più economica e semplice per la preparazione dei catalizzatori è la deposizione simultanea del promotore e della specie attiva, atteso che i quantitativi di Co (o Ni) e Mo necessari siano compatibili con la preparazione di una unica soluzione (ovvero si evitino fenomeni di coprecipitazione). Utilizzando questa tecnica, però, si pone un problema relativo alla valutazione delle interazioni delle coppie Co-Mo o Ni-Mo e sulle caratteristiche della dispersione sulla superficie catalitica. In particolare per il nichel è noto che, al termine della deposizione, esso può essere parzialmente incorporato in un monostrato di molibdato, mentre il resto di Ni^{2+} è allocato nella matrice di allumina. Inoltre la quantità di nichel successivamente riducibile dipende molto da quanto di esso è presente nello strato di molibdato ed esso facilita molto la riduzione degli ossidi di Mo. Inoltre la presenza di Ni sulla superficie del supporto presenta un grado di mobilità tale da promuovere, nel successivo stadio, la formazione dei solfuri metallici (pre-sulphiding). L'aggiunta di agenti complessanti (es. acido citrico) nella soluzione di impregnazione può significativamente modificare le proprietà catalitiche di questo sistema in quanto si modificano le interazioni tra promotore e componente attivo.

- *Pre-sulphiding*

La trasformazione degli ossidi in solfuri metallici determina il passaggio tra i precursori (molibdati) e la specie realmente attiva MoS_2. In alcuni casi il trattamento è effettuato tramite la deposizione di molecole contenenti zolfo e successivo trattamento di contatto con H_2. La maggioranza dei processi, però prevede l'alimen-tazione simultanea di idrogeno e molecole quali acido solfidrico, solfuro di carbonio o tiofene, con conseguente complessità nell'approccio volto alla comprensione delle dinamiche molecolari coinvolte. Quello che si osserva in tali processi è che l'interazione MoO_3-Al_2O_3 favorisce la formazione dei solfuri rispetto agli ossidi metallidi puri. In questo senso, è da evitare, nelle fasi di impregnazione, la formazione di cristalli di MoO_3 il cui utilizzo catalitico, in forma di solfuro, risulterebbe meno agevole.

Tuttavia il prodotto finale è sempre MoS_3, con potenziale formazione dell'intermedio MoS_2. In generale la conversione in solfuri supera il 90% e la struttura di MoS_2, composto naturale noto come molibdenite, è quella riportata nella Figura 123.

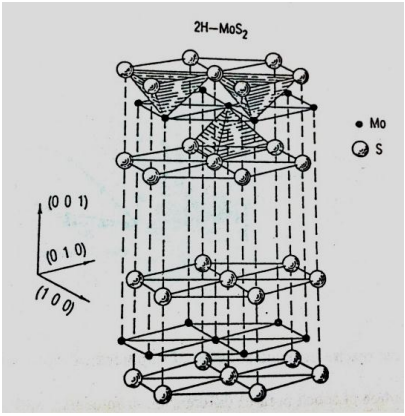


Figura 123. Struttura esagonale di MoS_2

Si vede una struttura esagonale che è stata ritrovata in maniera simile anche nel MoS_2 formato partendo da precursori immobilizzati su allumina. Un confronto con altri supporti evidenza che la γ-Al_2O_3 promuove la formazione di aggregati più piccoli, in forma di piccole piastre e questo potrebbe spiegare la migliore efficienza del molibdeno su tale supporto. Inoltre, proprio la

presenza di dette piccole piastre favorisce la sinergia con il cobalto, fino alla formazione di una fase Co-Mo-S che mostra, appunto, una migliore attività catalitica.

- *Caratterizzazione di catalizzatori Co-Mo e Ni-Mo su γ-Al_2O_3*

Sono stati caratterizzati due campioni di catalizzatori bimetallici da utilizzare nei processi di gassificazione. Le indagini hanno fatto uso di analisi di adsorbimento di azoto per la determinazione dell'area specifica superficiale del campione, dell'analisi a raggi X e infine dell'analisi chimica tramite la fluorescenza a raggi X.

Le analisi di adsorbimento di azoto hanno dato dei valori di area specifica superficiale intorno ai 200 m^2/g, mentre per quanto riguarda le analisi chimiche i valori sono riportati in Tabella 23.

Tabella 23. Analisi chimico-fisica dei catalizzatori

Elemento	Concentrazione			
	Catalizzatore Ni-Mo		Catalizzatore Co-Mo	
	Spot 1	Spot 2	Spot 1	Spot 2
Cu	8,8%	10,7%	1,3%	0,7%
Ni	0,2%	0,2%	7,2%	9,5%
Co	5,1%	12,6%	-	-
Fe	0,7%	1,2%	0,1%	0,0%
Ca	-	-	0,2%	0,2%
Mo	23,4%	36,9%	18,4%	22,9%
P	-	-	10,1%	14,5%
Al	61,7%	38,4%	62,7%	52,1%

Nella tabella sono riportate le percentuali in peso dei due campioni. Si nota subito la differenza tra i due nel contenuto di cobalto e d nichel mentre il molibdeno e l'alluminio hanno sostanzialmente un tenore equivalente.

Tali catalizzatori, al momento, non sono ancora stati testati all'interno del dispositivo ENEA, in quanto, come si è visto in precedenza, si è ritenuto opportuno lavorare con catalizzatori in fase omogenea, come l'NaOH, viste le basse temperature raggiungibili dal sistema di reazione, che comporta un'alta produzione di solido che avrebbe potuto inficiarne l'efficacia.

I campioni saranno testati nella successiva annualità una volta implementato l'apparato sperimentale con una resistenza supplementare per raggiungere le temperature di 450-500 °C per le quali sarà possibile apprezzare a pieno le potenzialità del processo per ciò che concerne la produzione di syngas. Lo sviluppo del lavoro nella prossima annualità prevede il loro utilizzo nel processo di gassificazione e, previa verifica della loro efficacia, la ripetizione delle analisi chimico-fisiche per valutare la stabilità degli stessi alle alte pressioni e temperature che si raggiungono nel processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche.

- *Modello termodinamico del processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche*

Sempre nell'ambito dell'accordo di collaborazione fra ENEA e Università della Calabria, si è provveduto a validare il modello termodinamico semplificato ricavato nel corso della scorsa annualità dell'AdP valutando gli effetti della conduzione del processo di gassificazione in condizioni supercritiche di due tipi di biomasse significative:

- gusci di mandorle
- fanghi provenienti da impianti di depurazione

Successivamente, è stata effettuata un'analisi comparativa della sostenibilità dei processi per le differenti biomasse sulla base di considerazioni energetiche riferite al bench-scale che prevede l'utilizzo del glucosio come biomassa modello. I dati dell'analisi termodinamica hanno mostrato un significativo impatto della tipologia di biomassa sulle prestazioni del processo di gassificazione, influenzando sia la qualità del gas in uscita, sia la sostenibilità energetica del processo [RdS/2012/287].

L'adozione delle condizioni di lavoro supercritiche, sebbene comporti un sensibile aumento dei costi di processo, lascia intravedere ottime possibilità di applicazione in considerazione di due elementi principali:

- la decomposizione termica della biomassa ad alte pressioni consente un recupero di idrogeno estremamente elevato dal momento che è possibile recuperare quote non secondarie dell'idrogeno

contenuto nell'acqua attraverso le reazioni di WSG;

- l'utilizzo delle alte pressioni non deve intendersi come fattore economicamente negativo e discriminate, dal momento che è possibile una integrazione energetica che prevede il recupero dell'energia di pressione a valle delle trasformazioni chimiche.

I risultati dell'analisi termodinamica condotta nel precedente anno di lavoro avevano suggerito di ampliare lo spettro di investigazione, valutando la fattibilità ed i vantaggi che si avrebbero nel sottoporre a processo di gassificazione in acqua supercritica anche altre biomasse quali ad esempio i gusci di mandorle o i fanghi provenienti da processi di depurazione di acque.

Oltre alle considerazioni di tipo termodinamico e chimico, è stato quindi condotto uno studio comparativo sulla sostenibilità energetica del processo in relazione alla differente biomassa utilizzata e nelle differenti condizioni operative di temperatura e pressione.

Al fine di valutare le differenti prestazioni delle biomasse nel processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche, la figura successiva riporta la composizione del gas prodotto su base secca, calcolata utilizzando tutte e tre le biomasse assumendo una pressione operativa di 280 bar.

La figura mostra che, rispetto al glucosio, le due biomasse alternative producono un gas con un tenore di idrogeno significativamente minore rispetto al glucosio, mentre un discorso differente può essere fatto per il monossido di carbonio ed il metano. Infatti l'utilizzo di fanghi nel processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche determina un significativo aumento del tenore di metano prodotto, diminuendo (altro fattore estremamente positivo) il tenore di anidride carbonica. Inoltre sia i gusci di mandorle che i fanghi rivelano un effetto positivo sul tenore di monossido di carbonio alle alte temperature operative del processo di SWG.

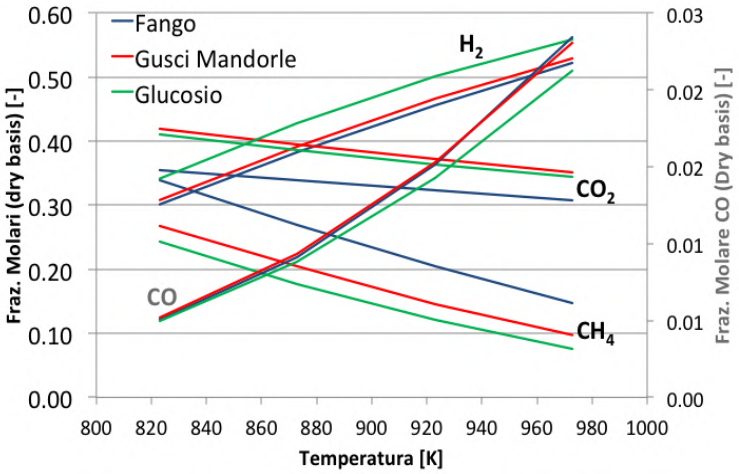


Figura 124. Variazione stimata nella composizione del gas prodotto da differenti biomasse durante il processo di SWG

Tali paragoni, però, possono risentire del differente rapporto tra C:H:O che mostrano le differenti biomasse. Per eliminare questa differenza è opportuno definire degli indici di resa in grado di paragonare realmente il tenore di H_2, CH_4 e CO contenuto nel gas prodotto con la composizione della biomassa di partenza. In particolare la resa in idrogeno può essere definita come:

$$\chi_{H_2} = \frac{\text{Moli di idrogeno all' equilibrio}}{\text{Moli di biomassa alimentata} \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)}$$

dove λ è il coefficiente stechiometrico dell'idrogeno nella formula minima della biomassa (12 per il glucosio, 7 per il fango e 6 per i gusci di mandorle). Si noti che il parametro χ può assumere valori superiori all'unità nel momento in cui, per effetto delle reazioni di metanazione e WSG, si riesce a produrre idrogeno dall'acqua utilizzata, cosa che rappresenta uno dei punti di forza dell'utilizzo di acqua in condizioni supercritiche.

Il grafico riportato nella Figura 125 mostra chiaramente l'efficacia delle condizioni di gassificazione in ambiente supercritico per tutte le biomasse analizzate. In tutti i casi, infatti, la resa aumenta all'aumentare della temperatura, superando il valore unitario per temperature operative comprese tra gli 870 ed i 920 K. Inoltre la figura rivela come i gusci di mandorle si rivelano ottima fonte di idrogeno anche rispetto al substrato modello (glucosio) mostrando dati di resa significativamente maggiori.

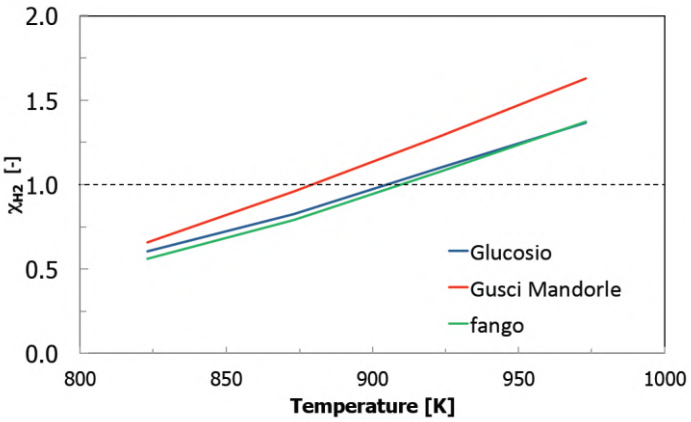


Figura 125. Resa in idrogeno

Comunque, allo stato attuale dell'analisi non è possibile identificare completamente i parametri che consentono una valutazione economica del processo affidabile. Infatti, l'assenza di dati cinetici relegano alla sola valutazione termodinamica gli strumenti utili per definire le prestazioni e, in tale senso, è possibile solo la quantificazione del bilancio energetico del processo.

In quest'ottica è stata condotta, per le differenti biomasse, una stima conservativa del fabbisogno energetico ed una successiva comparazione. In particolare la domanda energetica E del processo, per unità di biomassa entrante, è stata stimata come somma di differenti contributi:

$$E = E_R + E_C + E_{CS}$$

dove:

- E_R è l'energia di reazione per far avvenire la decomposizione della biomassa oltre alle reazioni di equilibrio coinvolte;
- E_C è l'energia di compressione necessaria per portare l'acqua in condizioni di pressione superiore alla pressione critica;
- E_{CS} è l'energia di necessaria per il riscaldamento dei prodotti considerati fino alla temperatura finale.

I dati così calcolati per ciascuna delle biomasse considerate e nelle differenti condizioni operative rappresentano solo una stima abbastanza grossolana della reale sostenibilità del processo. Risulta quindi più interessante e più affidabile riferirsi ancora ad una valutazione comparativa tra il processo che fa uso del substrato modello (glucosio) e quelli che utilizzano substrati reali. Pertanto è possibile definire un indice energetico Θ come:

$$\Theta = \frac{E(\text{Biomassa})}{E(\text{GLucosio})}$$

dove E(Biomassa) può essere riferita ai gusci di mandorla o ai fanghi rispettivamente.

Il grafico riportato nella Figura 126 mostra l'indice energetico Θ per entrambi i substrati a differenti pressioni. Il primo dato che emerge è la sostanziale indipendenza dell'indice dalla pressione operativa, testimoniato dal fatto che variando la pressione a parità di biomassa la famiglia di curve che si genera è molto vicina. Invece è un dato molto interessante il fatto che il processo che utilizza gusci di mandorle ha un impatto energetico sostanzialmente equivalente a quello che utilizza il substrato modello, mentre l'utilizzo del fango proveniente dalla depurazione di acque reflue comporta un aumento del fabbisogno energetico complessivo mai inferiore al 30%.

Occorre infine osservare come tali valutazioni non siano comunque sufficienti per una valutazione, anche preliminare, del conto economico del processo, in quanto la presenza di gas di uscita ad alte pressioni rappresenta comunque un importante aspetto nell'ottica di una integrazione energetica complessiva del processo stesso.

In definitiva, applicando per entrambe le biomasse prese in esame il modello termodinamico sviluppato nel corso dell'annualità precedente dell'AdP anno e valutando le composizioni del gas in uscita a differenti condizioni di pressione e temperatura operativa, si può affermare che il comportamento delle biomasse è stato in linea con quanto previsto per il substrato modello, anche se alcune differenze significative si sono riscontrate in merito alla composizione del gas.

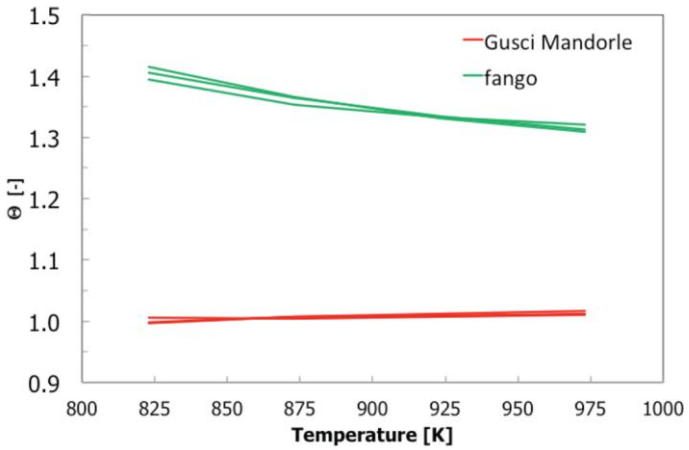


Figura 126. Indice energetico di differenti biomasse durante il processo di SWG

In particolare:

- il tenore di idrogeno diminuisce abbandonando il substrato modello;
- aumenta significativamente il tenore di metano quando si tratta il fango.

È stato anche definito un rapporto che ha consentito di stimare le performance del processo in termini di recupero di idrogeno e carbonio ed è emerso che:

- l'adozione di condizioni supercritiche consente di aumentare significativamente il recupero attraverso la conversione anche di H_2 proveniente dall'acqua. Questo obiettivo si persegue aumentando la temperatura al di sopra degli 850 K;
- il recupero di carbonio in componenti di interesse diminuisce all'aumentare della temperatura (dato in controtendenza rispetto all'idrogeno); risulta però significativamente maggiore il recupero di metano rispetto al monossido di carbonio all'aumentare della temperatura di processo.

E' stata inoltre proposta una stima di massima della sostenibilità del processo attraverso la valutazione del fabbisogno energetico. Per ridurre ulteriormente l'incertezza derivante dai dati, è stato definito un indice energetico come rapporto rispetto al processo con substrato modello.

L'analisi di tale indice ha rivelato alcune interessati evidenze:

- Le pressioni operative, nell'intorno della pressione critica dell'acqua, non hanno un impatto significativo sulla sostenibilità del processo;
- L'utilizzo di gusci di mandorle è notevolmente meno impattante (scarto 35%) rispetto al trattamento del fango da depurazione.

In conclusione, la ricerca condotta ha coperto in maniera ampia gli aspetti termodinamici e modellistici del processo rivelando la sostenibilità ed i vantaggi dell'utilizzo dell'acqua in condizioni supercritiche. Sarà interessante per il futuro muovere verso l'analisi delle cinetiche reali di reazione, inserendo nel modello anche l'utilizzo di catalizzatori metallici bifunzionali come ulteriore elemento per migliorare la resa del processo e verificandone la bontà con un confronto con i dati reali ottenuti dalle prove sperimentali effettuate presso il Centro ENEA della Trisaia.

D.2 Produzione di gas naturale sintetico SNG mediante processo di gassificazione di biomasse con tecnologia a doppio letto fluido ricircolante

Nell'ambito di questa linea di attività era previsto lo sviluppo di un'unità prototipale per la metanazione del syngas prodotto dalla gassificazione delle biomasse ed il relativo avvio delle attività sperimentali, in prima istanza con gas tecnici che simulano il syngas e, successivamente, con il gas reale proveniente da un impianto di gassificazione.

La produzione di gas naturale sintetico da biomasse o rifiuti solidi attraverso processi termochimici come la gassificazione rappresenta senz'altro una valida alternativa all'utilizzo di fonti fossili, e l'SNG potrebbe essere un elemento importante per la sicurezza energetica, contribuendo a diversificare le opzioni energetiche e ridurre le importazioni di gas naturale. L'utilizzo della biomassa ridurrebbe inoltre le emissioni di gas a effetto serra e, inoltre, lo sviluppo della tecnologia SNG porterebbe l'ulteriore vantaggio di contribuire alle innovazioni e sviluppo

delle tecnologie gasification-based come la generazione di idrogeno, la gassificazione a ciclo combinato (IGCC) ecc., che con l'SNG condividono il processo principale di produzione del gas di sintesi.

La produzione di SNG è simile a quella degli altri biocarburanti di sintesi: la biomassa è convertita in syngas attraverso una gassificazione indiretta, cioè l'energia necessaria al processo è alimentata dall'esterno, in cui si adotta come agente gassificante il vapore.

Il syngas prodotto dai processi di gassificazione può essere convertito in SNG attraverso un processo di metanazione, che ha luogo mediante l'impiego di catalizzatori, tra cui i più diffusi sono quelli a base di nichel-allumina, sebbene sforzi maggiori sono rivolti all'utilizzo di catalizzatori operanti a pressioni più basse di quelli attualmente disponibili su mercato al fine di ridurre i costi di impianto e di processo.

Nel corso dell'annualità 2011 dell'AdP sono stati studiati gli sviluppi più recenti osservati nell'ambito della messa a punto della fase catalitica attiva, per i quali si è indirizzati allo sviluppo di un catalizzatore che oltre all'elemento tradizionale Ni, che tipicamente contengono i catalizzatori attualmente in uso ed in commercio, contenga anche del Fe, valutando le cinetiche ottenute nei diversi laboratori che attualmente lavorano nell'ambito della catalisi eterogena per la reazione di metanazione.

E' stata inoltre sviluppata una unità prototipale per la metanazione del syngas mediante la reazione in fase eterogenea tra miscele di gas e di un catalizzatore commerciale a base di nichel all'interno di una camera di reazione [Report RdS/2012/296].

A monte dell'impianto sono presenti i pacchi bombole di CO, H_2, CO_2, e CH_4, oltre all'azoto necessario per le operazioni di inertizzazione e riscaldamento dell'unità prototipale per il testing di catalizzatori di metanazione.

La camera di reazione è costituita da un tubo flangiato avente un diametro di 1½" e lungo 1 m, all'interno del quale sono inserite in maniera simmetrica due piastre mobili forate che sono fissate su due perni filettati tramite dado e controdado, in modo da permettere la regolazione della posizione delle stesse lungo i perni stessi, a loro volta saldati ad un'estremità a due piastre fisse, anch'esse forate. Tale sistema consente di poter regolare la massa catalitica e quindi la portata di syngas alimentabile al reattore.

Il reattore è stato realizzato utilizzando un tubo da 4 cm che, per le masse catalitiche da trattare e per i GSV in gioco, rappresenta una condizione di funzionamento reale, in modo da avere informazioni di processo necessarie per la scalabilità con "n" candele in parallelo in grado di sopperire alle diverse esigenze di impianto.

Sotto questa ipotesi la massima quantità di metano producibile dalla candela catalitica sarà pertanto pari a 160 g/h (0,2 Sm^3/h), mentre il carico termico necessario al riscaldamento della miscela di syngas può arrivare a circa 0,5 kW. Viceversa, la formazione di vapore in uscita ed il calore fornito dalle reazioni di metanazione comporteranno la necessità di dover sottrarre calore al gas prodotto per un totale di circa 1 kW.

I gas in uscita dai singoli pacchi bombole, con i valori di portata desiderati, vengono convogliati in una camera di miscelazione e collegati all'unica linea che porta la miscela di gas verso la camera di reazione sulla quale sono installati:

- un misuratore di portata massica;
- una termocoppia per la misura della temperatura;
- un misuratore di pressione.

I valori misurati vengono inviati al sistema di controllo per poter monitorare i valori del gas all'ingresso della camera di reazione.

Prima di entrare nel reattore, la miscela di gas viene riscaldata in modo da portare la temperatura della miscela di syngas al valore operativo per la reazione, con la possibilità di poter raggiungere temperature superiori ai 500 °C, sebbene le condizioni operative individuate come ottimali nel corso dei precedenti studi e i catalizzatori utilizzati per la reazione di metanazione suggeriscano di operare a temperature pari a circa 300 °C o inferiori.

La miscela di syngas reagita passa attraverso un condensatore nel quale si raccoglie la condensa e da cui è quindi possibile monitorare l'avanzamento delle reazioni di metanazione.

Il pannello ed il PLC sono programmati per poter prevedere il pilotaggio sia manuale che automatico delle valvole di regolazione di pressione e di portata, nonché la visualizzazione delle varie misure di temperatura, pressione e portata dei singoli strumenti presenti a corredo dell'unità prototipale.

In Figura 127 si riporta il sinottico HMI dell'impianto di produzione di SNG da syngas.

Il sistema sarà messo in funzione nel corso della prossima annualità dell'AdP, alimentandolo in una prima fase con una miscela di gas simulanti la composizione del syngas, per valutare le prestazioni dei diversi catalizzatori,

fissando la portata di alimentazione e studiando le cinetiche di reazione al variare delle condizioni operative. Successivamente, si provvederà ad accoppiare direttamente il reattore di metanazione ad un impianto di gassificazione pilota bench-scale presso il Centro della Trisaia al fine di verificare il comportamento e la durabilità (shelf life) degli stessi catalizzatori in presenza delle impurezze ancora contenute nel syngas a valle del sistema di clean up.

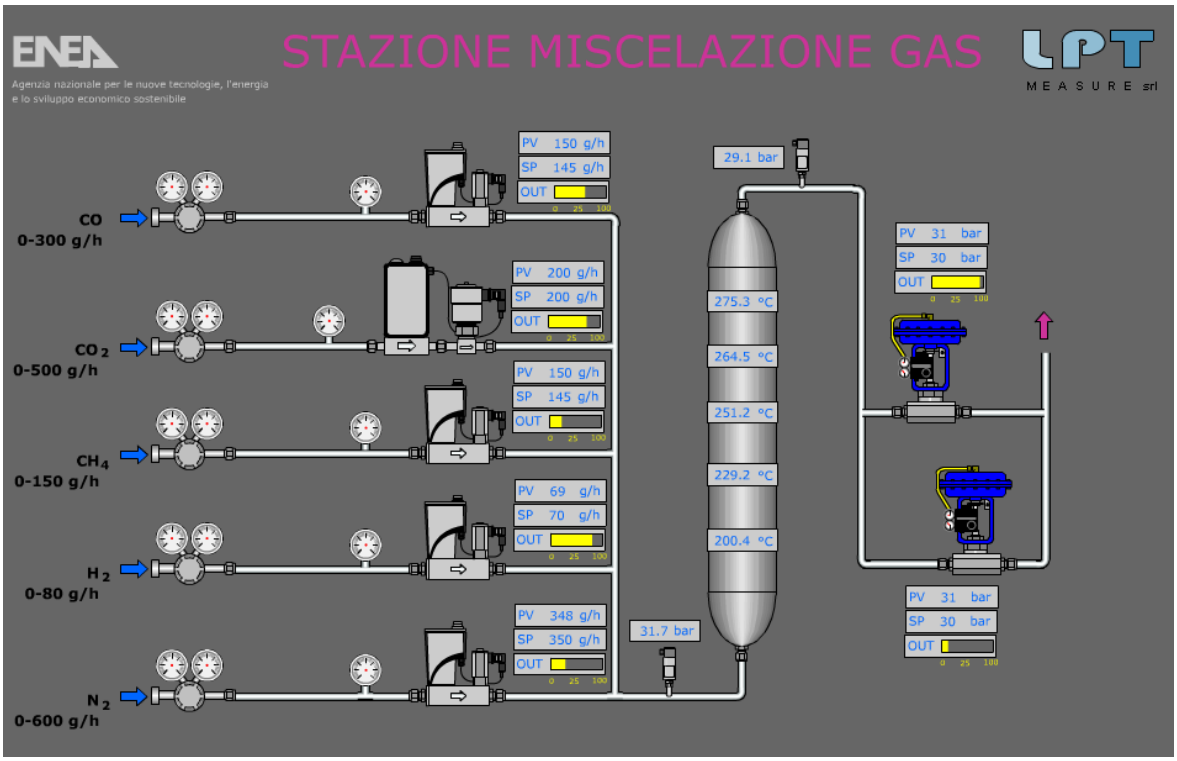


Figura 127. Sinottico impianto per la produzione di gas naturale sintetico da syngas

- *Purificazione e upgrading del syngas per la produzione di SNG*

L'arricchimento del syngas in metano tramite la reazione di metanazione rappresenta solo lo stadio finale di un processo completo per la produzione di SNG dalla gassificazione di biomasse, in quanto il gas in uscita dal gassificatore necessita, a valle della rimozione degli inquinanti organici (TAR), di un adeguato trattamento di upgrading, con la rimozione della CO_2 presente nella miscela, in modo da avere, per quanto possibile, una corrente di alimentazione del reattore di metanazione costituita solo da CO e H_2.

Le attività di ricerca sulla rimozione della CO_2 nel processo di produzione di SNG da biomasse sono state condotte in stretta collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali dell'Università dell'Aquila dove, attraverso la simulazione con il software commerciale CHEMCAD, erano state individuate nelle precedenti annualità dell'AdP le condizioni ottimali di esercizio in funzione dei parametri forniti dallo studio di configurazioni impiantistiche per massimizzare la produzione di metano.

Partendo da uno studio sulle diverse tecnologie utilizzate dall'industria chimica per la rimozione della CO_2 da miscele di gas da purificare o avviare, dopo averne ottimizzato la composizione, a successivi processi di sintesi catalitica [Report RdS/2012/285] si è focalizzato l'interesse sui processi di Sorption Enhanced Reaction Processes (SERP), che attraverso l'adsorbimento di CO_2 migliorano le rese di reazioni come quella di reforming e di water gas shift.

E' stato progettato e realizzato un micro-reattore a letto fisso per effettuare prove di adsorbimento/desorbimento di CO_2 a media pressione e ad una temperatura ambiente intorno ai 400 °C, utilizzando diversi tipi di sorbenti solidi (ossidi basici, carbonati e idrotalciti), sia commerciali che sintetizzati in laboratorio. L'interesse di queste prove era legato all'individuazione delle prestazioni di un sorbente che presenti un'alta capacità di cattura selettiva della CO_2, con la conseguente formazione di carbonati inorganici riutilizzabili in diversi processi industriali, e sia in grado di operare ciclicamente (assorbimento/rigenerazione) in condizioni compatibili con la simultanea reazione di water gas shift (300-400 °C, 5-30 bar).

La caratterizzazione dei sorbenti è stata condotta mediante analisi SEM, EDX ed XRD. Con il metodo BET (Brunauer-Emmett-Teller) sono state calcolate le aree superficiali ed il diametro dei pori, mentre con il metodo BJH (Barrett-Joyner-Halenda) si è determinato il volume cumulativo dei pori.

I diversi sorbenti, dopo esser stati caratterizzati, sono stati opportunamente macinati e setacciati, al fine di selezionare la frazione adatta al micro-reattore. Le dimensioni ottimali delle particelle di sorbente da utilizzare nel micro-reattore si aggirano intorno ai 400 µm. Nelle prove sperimentali sono state eliminate le frazioni con dimensioni superiore ai 500 µm e inferiori ai 300 µm.

Nella Figura 128 sono riportate le curve di risposta in test di adsorbimento a gradino positivo effettuati sui vari sorbenti.

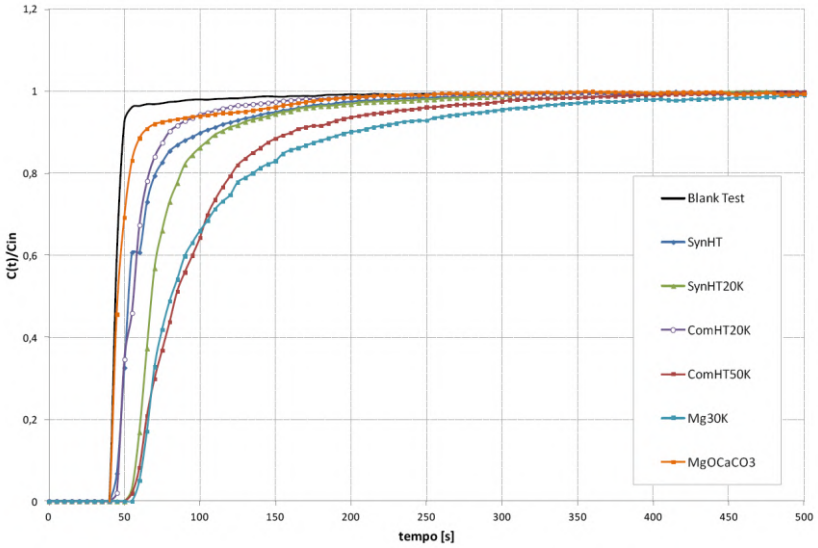


Figura 128. Curve di risposta in test di adsorbimento a gradino positivo T = 350°C; P_{CO2} = 0,1 bar di diversi sorbenti

Particolarmente interessanti sono i risultati riportati dalle curve delle idrotalciti (HT) impregnate con il carbonato di potassio, che mostrano una sostanziale differenza rispetto agli altri sorbenti, come si evince anche dai dati riportati nella , che mostra le capacità sorbenti del primo ciclo di adsorbimento/desorbimento dei composti testati, la massa di materiale caricato all'interno del micro-reattore, e la distribuzione dimensionale delle particelle testate, nelle condizioni di temperatura e P_{CO2} pari a 350 °C e 0,1 bar.

La capacità sorbente è confrontabile con i valori di letteratura a parità di condizioni operative. All'aumentare della percentuale di carbonato di potassio impregnato sull'idrotalcite aumenta la capacità adsorbente, così come riportato anche in letteratura. Si è visto come le idrotalciti impregnate con il carbonato di potassio diventino più performanti e come la loro capacità sorbente aumenti linearmente con la percentuale di K_2CO_3 usato durante l'impregnazione e, a parità di percentuale d'impregnazione, le idrotalciti sintetizzata e commerciale mostrano una capacità sorbente confrontabile.

Tabella 24. Campioni di idrotalciti testati in micro-reattore

Nome campione	Descrizione
ComHT20k	Idrotalcite commerciale +20% K_2CO_3
ComHT50k	Idrotalcite commerciale + 50% K_2CO_3
SynHT	Idrotalcite sintetizzata
SynHT20k	Idrotalcite sintetizzata + 20% K_2CO_3
Mg30k	$MgO/Mg(OH)_2$ + 30% K_2CO_3
$MgOCaCO_3$	Dolomite parzialmente calcinata

Tabella 25. Capacità adsorbente di diversi campioni al 1° ciclo di adsorbimento

Sorbente	Capacità sorbente CO_2 [mmol/g]	d_p [µm]	Peso del campione caricato nel micro-reattore[g]
ComHT20K	0,306	300-500	1,9
ComHT50 K	0,409	300-500	2,3
SynHT	0,284	300-500	1,9
SynHT20K	0,331	300-500	2,6
Mg30K	1,107	300-500	1,6
MgOCaCO3	0,0190	300-500	6,2

Il campione Mg30k risulta avere una risposta molto buona. Attualmente, infatti, la carbonatazione della brucite ($Mg(OH)_2$) in letto fluidizzato rappresenta uno dei processi più investigati nella CCS (CO_2 capture and storage).

La dolomite parzialmente calcinata non dimostra invece di essere performante a causa delle condizioni operative, che rendono termodinamicamente sfavorita la reazione di carbonatazione dell'ossido di magnesio, attivato attraverso la parziale calcinazione della dolomite.

Dopo i risultati preliminari ottenuti, si sono scelti i sorbenti più performanti per la valutazione in cicli ripetuti di adsorbimento/desorbimento. Il gas è stato alimentato al letto di materiale solido che assorbe preferenzialmente la CO_2, permettendo il passaggio degli altri componenti della miscela gassosa. Quando il letto è saturo, la CO_2 viene allontanata mediante una riduzione di pressione (Pressure Swing Adsorption - PSA) con un flusso equicorrente di azoto per permetterne la rigenerazione.

Nella Figura 129 sono riportati i risultati dei cicli effettuati a P_{CO2} = 5 bar e T = 350 °C.

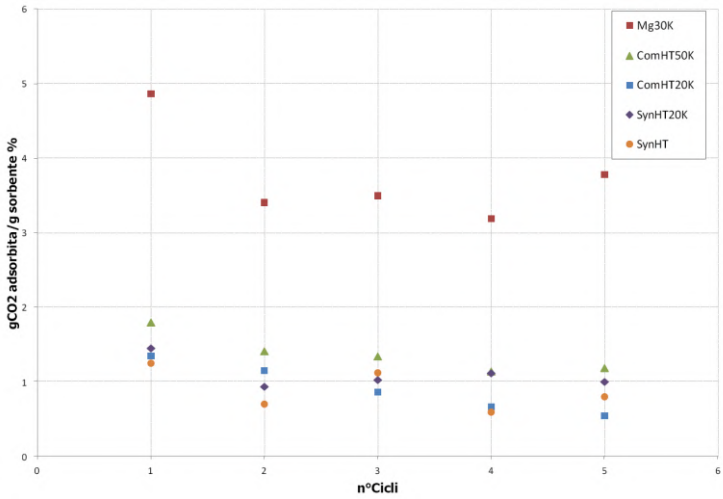


Figura 129. Cicli di adsorbimento/desorbimento con P = 5 bar T = 350°C

Nelle prove sperimentali di adsorbimento e desorbimento della CO_2 effettuate con il micro-reattore dell'Università dell'Aquila, i sorbenti dopo il primo ciclo vedono diminuire la loro capacità di adsorbimento, che poi oscilla lungo un valore medio stabile nei cicli successivi.

Le prove effettuate mostrano come le idrotalciti non impregnate ed impregnate con il 20% K_2CO_3 mantengano in cinque cicli una buona stabilità termica e meccanica, caratteristiche confermate dalle analisi al SEM. La superficie esterna delle particelle dei campioni SynHT e SynHT20k, analizzate, risulta infatti in entrambi i campioni compatta e non presenta fratture lungo la superficie, come mostrato in Figura 130.

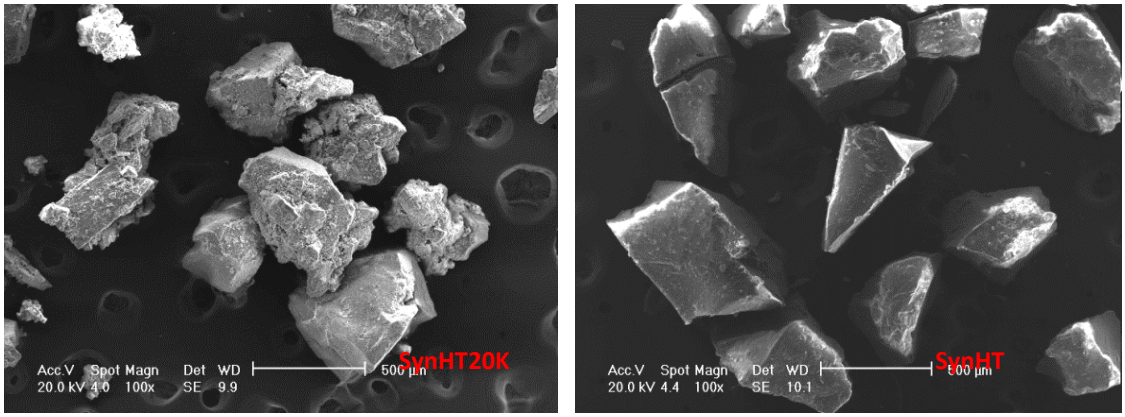


Figura 130. Idrotalciti sintetizzate dopo 5 cicli di adsorbimento/desorbimento della CO_2

E. 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, nonché verso tematiche collegate come quelle dell'idrogeno e delle celle a combustibile, hanno visto anche nel corso dell'annualità 2011 dell'Accordo di Programma sulla Ricerca di Sistema Elettrico una presenza significativa dell'ENEA sia a supporto della Pubblica Amministrazione, per la definizione di un quadro nazionale di riferimento nel settore della produzione di energia da fonti rinnovabili, con particolare riferimento alle biomasse, sia in campo internazionale, con l'obiettivo di favorire il rafforzamento della presenza italiana nelle collaborazioni internazionali sul tema della bioenergia.

In particolare, nel periodo di riferimento ENEA ha partecipato, in rappresentanza dell'Italia, agli Implementing Agreement dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) relativi a Bioenergy, Advanced Fuel Cells e Production and Utilization of Hydrogen.

Per l'Implementing Agreement Bioenergy ha coordinato, insieme al GSE, il contributo delle altre strutture nazionali interessate e partecipato direttamente alle attività dei *Task 42 - Biorefineries: co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass* e *Task 33 - Thermal gasification of biomass*.

Nell'ambito dell' Implementing Agreement Advanced Fuel Cells, l'ENEA ha promosso l'ingresso di nuovi partner stranieri (Cina e Russia) e la preparazione di due rapporti sullo stato dell'arte nel mondo riguardanti rispettivamente le celle a carbonati fusi e quelle ad ossidi solidi, oltre a partecipare alle attività dei diversi task sulle diverse tecnologie e le loro applicazioni.

Per l'Implementing Agreement su Production and Utilization of Hydrogen la partecipazione ENEA, ed il coordinamento delle altre strutture nazionali interessate (università, CNR, ENEL), ha riguardato soprattutto i task relativi alla produzione da piccoli reformer, alla produzione ad alta temperatura ed all'analisi globale dei sistemi a idrogeno.

Nell'ambito di tutti gli Implementing Agreement 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.

Inoltre, ENEA ha curato la partecipazione nazionale alle attività di EERA (European Energy Research Alliance) su Bioenergy, Celle a combustibile e idrogeno, ha partecipato, a supporto del MATTM, ai lavori dell'International Partnership for Hydrogen Economy ed ha contribuito, in qualità di componente del board degli enti di ricerca europei (N.ERGHY), alla definizione dei programmi su idrogeno e celle a combustibile gestiti dalla partnership pubblico-privata Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

I contributi delle Università e della cobeneficiaria FN nell'ambito dei diversi obiettivi del PAR 2011 dell'AdP sono riportati e descritti in dettaglio nelle sezioni precedenti. Per le singole università nel seguito si riporta quindi l'oggetto della collaborazione con un riferimento all'obietto all'interno del quale si inquadra.

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale ha condotto uno studio sperimentale volto al confronto tra sistemi di digestione anaerobica in doppio stadio per la produzione combinata di H_2 e CH_4 e processi convenzionali per la produzione di solo CH_4 da residui organici biodegradabili (Obiettivo A) – Report RdS/2012/286.

Università della Tuscia, Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche

I temi affrontati dal Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche dell'Università della Tuscia hanno riguardano la valorizzazione dei risultati degli studi effettuati nell'annualità precedente relativi alla caratterizzazioni genetica delle popolazioni microbiche, utilizzabili per il pretrattamento biologico di substrati contenenti componenti lignocellulosiche ai fini della successiva digestione anaerobica. Oggetto dell'accordo è stato, pertanto, il pretrattamento microbico, effettuato in diverse condizioni operative, comparabili con quelle riscontrabili in situazioni reali (Obiettivo A) - Report RdS 2012/290.

Università di Salerno, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Le attività svolte hanno riguardato lo studio del meccanismo macroscopico della reazione di ossidazione parziale selettiva di H_2S in biogas, su catalizzatori a base di V_2O_5/CeO_2, messi a punto nel corso della precedente annualità del progetto, nonché la formulazione di un *carrier* da impiegare per la preparazione di catalizzatori strutturati per il reattore catalitico (Obiettivo B) - Report RdS/2012/293.

Università Campus Biomedico di Roma, Facoltà di Ingegneria

L'attività ha riguardato la conduzione di un'attività sperimentale, da svolgere presso i laboratori ENEA, sui processi di rimozione dell'H_2S da una corrente di biogas e, in parallelo, lo sviluppo di uno studio modellistico i cui risultati serviranno al tempo stesso per la migliore pianificazione della campagna sperimentale e per l'analisi dei relativi risultati (Obiettivo B) - Report RdS/2012/302.

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente (DICMA)

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma La Sapienza hanno riguardato l'applicazione del modello per la simulazione del processo PSA, sviluppato da DICMA nella precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, per un'analisi comparativa tecnico-economica di vari processi e/o tecnologie di upgrading, selezionati in precedenza (Obiettivo A) - Report RdS/2012/301.

Università della Calabria, Dipartimento di Modellistica per l'Ingegneria

Nell'ambito della collaborazione sono stati condotti test sperimentali di separazione di gas puri, miscele binarie di gas presenti nelle correnti di biogas e di biogas simulato depurato, su membrane polimeriche innovative che sono state poi caratterizzate dalla stessa Unità e su membrane inorganiche fornite dagli altri partner.

L'attività si inquadra nell'ambito della linea di ricerca relativa all'ottimizzazione di processi chimico fisici di abbattimento degli inquinanti e di upgrading del biogas a biometano, utilizzabile tal quale o, opportunamente depurato, da immettere in rete, ed al recupero della CO_2 (Obiettivo B) - Report RdS/2012/289.

Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali

Le attività svolte dall'Università di Bologna hanno riguardato, l'analisi sperimentale di membrane polimeriche, commerciali e non, atte alla separazione della CO_2 da metano, al fine di valutarne le potenzialità in condizioni il più possibile simili a quelle di reale utilizzo (Obiettivo B) - Report RdS/2012/288.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT)

il Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia Politecnico di Torino ha svolto attività di studio sui sistemi catalitici di trattamento dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse lignocellulosiche in impianti cogenerativi di piccola-media taglia (Obiettivo B) - Report RdS/2012/086.

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamenti Ambientali (DETEC)

Nel corso delle precedenti annualità, all'interno della collaborazione con il Dipartimento DETEC è stato sviluppato un modello di calcolo in grado di analizzare alcune tra le filiere bio-energetiche più diffuse nel sistema produttivo nazionale contestualizzandole dal punto di vista territoriale allo scopo di poterne eseguire un'approfondita

valutazione sotto gli aspetti economico, energetico e ambientale che concorrono a determinarne la sostenibilità globale della valorizzazione energetica delle biomasse-rifiuti. Lo strumento AIDA, è stato ulteriormente sviluppato prevalentemente nella direzione del completamento del database di riferimento, del collaudo di tutte le funzionalità implementate, e del trasferimento sul server ENEA dedicato alla piattaforma web (Obiettivo C) - Report RdS/2012/300.

Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali

I temi sviluppati nell'ambito della collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali dell'Università della Calabria hanno lo studio della presenza di acqua supercritica sulla formazione di composti organici contenuti nel syngas e sull'influenza della reazione di CO-shift nelle condizioni operative dell'indagine. (Obiettivo D) - Report RdS/2012/291.

L'attività costituisce il proseguimento delle azioni intraprese nella precedente annualità, nel corso della quale era stato condotto uno studio sul processo di gassificazione di biomasse con acqua in condizioni supercritiche che ha consentito di ricavare un quadro completo circa le tecnologie ed i processi impiegabili, e di produrre un modello termodinamico semplificato

Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali

Le attività svolte dall'Università dell'Aquila si inseriscono nel quadro della linea relativa alla produzione di gas naturale sintetico (SNG) mediante processo di gassificazione con tecnologia a doppio letto fluido ricircolante e in particolare riguardano l'implementazione del processo con una sezione di metanazione e successivo upgrading per ottenere SNG idoneo all'immissione in rete di distribuzione (obiettivo D) - Report RdS/2012/285

FN, Nuove Tecnologie e Materiali Avanzati S.p.A.

Le attività sono state svolte nel quadro della linea focalizzata all'ottimizzazione di processi chimico-fisici di abbattimento degli inquinanti e di upgrading del biogas a biometano (Obiettivo B) - Report RdS/2012/292

Le attività svolte in particolare hanno riguardato:

- lo sviluppo e la caratterizzazione di membrane ceramiche, con la messa a punto di un processo per la formatura di supporti ceramici microporosi per membrane inorganiche selettive di separazione della CO_2 nel biogas.
- lo studio delle emissioni di inquinanti da impianti di combustione alimentati a biomasse solide, con la ricerca sullo stato dell'arte e la realizzazione di supporti ceramici per dispositivi di abbattimento degli inquinanti nei fumi di combustione dei cogeneratori a biomassa solida lignocellulosica.

Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

L'approvvigionamento di energia rappresenta un fattore chiave per sostenere lo sviluppo economico e sociale dell'economia e, di conseguenza, il benessere della popolazione. In quest'ottica le fonti di energia rinnovabili, e tra queste il fotovoltaico (FV), possono fornire un contributo sostanziale. Il mercato del fotovoltaico è cresciuto in maniera esponenziale, nonostante la crisi economica e finanziaria. Nel 2011 la produzione di celle e moduli fotovoltaici a livello mondiale ha raggiunto i 30 GW, registrando un incremento della produzione pari al 25% rispetto all'anno precedente. In Italia si è osservata una forte crescita della filiera fotovoltaica, favorita sia dal quadro normativo, fortemente incentivante per la produzione di energia eletrica da installazione di nuovi impianti FV, che dalla presa di coscienza da parte della pubblica opinione del potenziale che l'energia solare rappresenta per la produzione di elettricità. Il GSE ha dichiarato che nel 2011 in Italia è stata connessa alla rete nuova potenza elettrica fotovoltaica per circa 9,5 GW, raggiungendo una potenza complessiva di oltre 12,7 GW, con una produzione di energia di circa 10800 GWh. In tal modo l'Italia si è posizionata al primo posto in Europa per capacità installata nell' anno 2011 e al secondo posto per capacità totale installata. Il dato aggiornato al settembre 2012 mostra una ulteriore capacità produttiva di circa 2632 MW, con una produzione di energia elettrica stimata superiore ai 13360 GWh.

Negli ultimi anni i prezzi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie soprattutto all'incremento della produzione, con la creazione di grandi unità produttive in Asia che ha determinato una diminuzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia l'abbassamento di tali costi a valori inferiori a 0,5 €/Wp potrà favorire l'affermarsi di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti adottati. Considerate le grandi potenzialità di riduzione di costo delle tecnologie fotovoltaiche basate su film sottili di materiale semiconduttore, gli studi svolti all'interno di questo progetto puntano a migliorare le prestazioni degli attuali moduli a film sottile, superando le difficoltà di alcune tecnologie legate all'utilizzo di materiali scarsamente disponibili, e a sviluppare nuove celle solari basate su materiali organici.

I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie ad una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari "micromorfe", ottenute utilizzando silicio amorfo e microcristallino. La riduzione del costo di fabbricazione di tali moduli richiede lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per aumentare la loro efficienza di conversione e ridurre i tempi di produzione. Questi avanzamenti si possono ottenere migliorando l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo e sviluppando materiali con coefficienti di assorbimento della luce solare più elevati. Entrambi questi accorgimenti consentirebbero di aumentare l'efficienza di conversione e, dal punto di vista industriale, avrebbero il vantaggio di ridurre i tempi di produzione potendo utilizzare dispositivi con spessori ridotti. In una prospettiva di lungo termine si ritiene, inoltre, interessante esplorare la possibilità di impiegare materiali assorbitori nanostrutturati.

I moduli basati sui film sottili policristallini di CIS e CdTe, invece, hanno problemi connessi con l'utilizzo di materiali scarsamente disponibili con la conseguente esigenza di sostituirli. Nel caso del CIS, in particolare, è da sperimentare la possibilità di sostituire l'indio con coppie di elementi dei gruppi II e IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Inoltre, visto che la famiglia dei composti Cu_2-II-IV-VI_4 presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio, l'attività di ricerca potrà, in una fase successiva, essere rivolta allo sviluppo di celle a multigiunzione a basso costo ed alta efficienza. Le difficoltà di ottimizzazione per le celle policristalline con gap maggiori di 1,5 eV rendono questa ricerca ad alto rischio ma i possibili grandi vantaggi e l'alto tasso di innovazione giustificano un impegno in questo settore.

Lo sviluppo di celle organiche è la strada da perseguire per arrivare a dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori. La leggerezza e la flessibilità del componente fotovoltaico finale rendono tale tecnologia appetibile per prodotti speciali quali caricabatterie, alimentatori portatili per applicazioni militari, etc.. Di contro è necessario affrontare e superare le difficoltà concernenti la definizione di materiali che possano garantire un'adeguata efficienza di conversione stabile nel tempo. Le attività proposte su tale tema punteranno a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici. Saranno inoltre investigate tecnologie di stampa per la deposizione dello strato attivo al fine di valutare le potenzialità di questa tecnologia innovativa che presenta il vantaggio di ridurre i costi di processo.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale del programma è la messa a punto di tecnologie avanzate nel campo del fotovoltaico a film sottile con:

- il perfezionamento delle celle solari a film sottile di II generazione (a base di silicio e CIS) per una applicazione industriale nel breve-medio termine;
- lo sviluppo di nuovi materiali per celle solari innovative a base di quantum dot di silicio e polimeri.

Lo sviluppo delle attività nell'arco della durata del programma e per le diverse linee è il seguente:

Fotovoltaico avanzato a base di film sottili di silicio

- ottimizzazione dell'assorbimento della radiazione solare mediante l'utilizzo di nuovi materiali e nuove architetture allo scopo di ridurre gli spessori di materiale attivo nelle celle solari;
- sviluppo di strati assorbitori alternativi basati su concetti emergenti ed innovativi per utilizzo nelle celle tandem;
- sviluppo di moduli prototipali su substrati di vetro con elettrodo frontale a base di ZnO, ed efficienza non inferiore al 10%;
- sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino.

Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici o ibridi

- messa a punto di tecnologie e processi per la realizzazione di celle a base polimerica con efficienze non inferiori al 6%;
- definizione di una roadmap per le celle polimeriche che valuti le potenzialità di tale tecnologia sulla base dei risultati conseguiti.

Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI

- sviluppo di film sottili di un materiale policristallino Cu_2-II-IV-VI_4 con le migliori proprietà optoelettroniche per la costruzione di celle fotovoltaiche;
- sviluppo di un processo completo per la realizzazione di un dispositivo fotovoltaico a base del materiale policristallino Cu_2-II-IV-VI_4 selezionato, con efficienza non inferiore al 5% su piccola area.

Nel Piano di Realizzazione 2011 erano previsti cinque obiettivi intermedi:

A. *Sviluppo e realizzazione di strati assorbitori e drogati innovativi per celle a film sottile di silicio micromorfe*
B. *Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo a film sottile di silicio*
C. *Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino*
D. *Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI*
E. *Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici*

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

Le attività sul fotovoltaico a film sottile di silicio sono state finalizzate al miglioramento delle prestazioni di celle tandem micromorfe realizzate con una cella posteriore di silicio microcristallino e una frontale di silicio amorfo, puntando alla possibilità di ridurre gli spessori degli strati assorbitori della cella a valori inferiori al micron. Le attività hanno riguardato lo studio di materiali assorbitori e drogati alternativi a quelli generalmente utilizzati. Inoltre è stato avviato lo sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno della cella. Sono stati sviluppati film di ossido di silicio di tipo n, da impiegare come materiali drogati alternativi per i dispositivi. Applicando tali materiali nelle celle tandem, sono state ottenute delle buone correnti di corto circuito, impiegando un semplice strato di argento come contatto posteriore delle celle (generalmente viene utilizzato un doppio strato ZnO/Ag) e senza l'utilizzo di alcuno strato intermedio tra le due celle componenti. Adottando quindi lo strato n innovativo, con un processo di fabbricazione semplificato, sono state realizzate celle micromorfe molto sottili (spessore totale inferiore al micron), che significa dimezzare i tempi tipici di fabbricazione del dispositivo, ottenendo valori di efficienza superiori al 9%.

Parallelamente alla sperimentazione sulla parte attiva del dispositivo, è continuato lo sviluppo di elettrodi frontali di ZnO caratterizzati da una rugosità superficiale tale da determinare un efficace intrappolamento della radiazione

solare. Sono stati sviluppati TCO "Full Haze" a base di ZnO prodotto mediante MOCVD e modificati con l'ausilio della tecnica del wet etching che consente di modulare e controllare la rugosità superficiale. Questo tipo di substrato, caratterizzato da una doppia testurizzazione, ha mostrato elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse nella tecnologia delle celle micromorfe. I dispositivi fabbricati sui substrati "Full Haze" hanno mostrato nella regione infrarossa della radiazione una risposta spettrale migliore di quella ottenuta utilizzando substrati di tipo commerciale.

Per quanto riguarda lo sviluppo di strati assorbitori alternativi a quelli attuali, sono proseguite le attività sullo studio di film nanostrutturati di silicio in matrice di ossido di silicio da utilizzare come strati assorbitori innovativi nella cella anteriore e di film di silicio germanio microcristallino da utilizzare nella cella posteriore in sostituzione del silicio microcristallino. I materiali sono stati caratterizzati e inseriti in celle p-i-n per verificarne il potenziale utilizzo.

E' stata avviata un'attività sullo sviluppo di celle sottili in silicio cristallino (cSiTF) su wafer di c-Si sottili di spessore 50 - 100 µm. L'attività ha previsto lo studio di due architetture differenti di cella: dispositivo con emitter ottenuto per diffusione termica del drogante e dispositivo ad eterogiunzione con emitter innovativo in ossido di silicio drogato n ottenuto con tecnologia PECVD. Si è realizzato un primo dispositivo ad eterogiunzione, basato su di un wafer quasi mono-cristallino di tipo p (spessore 180 µm) sul quale si è depositato un emitter innovativo in SiOx drogato n, ottenendo un'efficienza iniziale del 15,8%. L'attività di ricerca sulle celle in cSiTF con emitter a diffusione termica è stata volta principalmente alla messa a punto dei processi di diffusione di drogante e di crescita di ossido di silicio, entrambi realizzati ad alta temperatura (> 850 °C) con forno a tubo aperto. Poiché l'attività ha l'obiettivo di utilizzare strati sottili di c-Si è importante prevedere un'adeguata strategia di confinamento ottico della radiazione solare. E' stato, pertanto, condotto uno studio su riflettori di Bragg in silicio poroso, realizzando multistrati con diversi profili di riflettanza.

L'attività sui film sottili policristallini è stata incentrata sulla realizzazione di celle fotovoltaiche basate sul semiconduttore quaternario Cu_2ZnSnS_4 (CZTS). La crescita dei film di CZTS avviene a partire da precursori composti da multilayer di ZnS, Sn e Cu che subiscono poi un annealing in presenza di zolfo in un forno di solforizzazione a tubo aperto. E' stata valutata la possibilità di sostituire il forno a tubo con un forno di processo rapido (RTP), precedentemente utilizzato per altri scopi. Il forno è stato rimesso in funzione, ma il controllo della temperatura si è rivelato abbastanza difficile, viste le proprietà altamente corrosive dei vapori di zolfo. Sono stati comunque realizzati alcuni campioni che però non hanno mostrato alcun miglioramento rispetto a quelli fatti con il forno a tubo standard. E' stata poi studiata l'influenza di variazioni fini di composizione del precursore sulle proprietà optoelettroniche dei film e sull'efficienza dei dispositivi finali. Si è evidenziato che la gap del materiale aumenta sensibilmente (da 1,45 a 1,62 eV) all'aumentare del contenuto di Sn nel film. Queste variazioni di gap sono correlate con cambiamenti drastici della concentrazione di difetti dei film ed hanno perciò anche un influsso rilevante sui parametri fotovoltaici dei dispositivi. Il lavoro svolto sui vari step di processo di fabbricazione delle celle ha consentito di ottenere un'efficienza massima di conversione del 2,5%.

Misure di tipo composizionale eseguite lungo lo spessore dei film hanno evidenziato una tendenza alla segregazione dello Zn sul retro del materiale che probabilmente deriva dai differenti coefficienti di diffusione di Cu, Sn e Zn. L'unica soluzione a questo problema sembra essere la crescita di film in cui i metalli sono già solforizzati fin dall'inizio e per questo motivo è stato effettuato un up-grade del sistema di sputtering confocale per poter passare al co-sputtering da solfuri. Contemporaneamente si è anche acquisito un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti di Mo e ZnO.

L'attività sulle celle polimeriche ha avuto l'obiettivo di migliorare le efficienze di conversione dei dispositivi ottenute utilizzando come polimero semiconduttore il poli-3-esiltiofene (largamente usato in letteratura) in modo da renderli appetibili da un punto di vista industriale. Per ottenere questo risultato è stato necessario utilizzare altri materiali polimerici attivi che avessero una struttura elettronica più favorevole sia per incrementare la corrente di uscita delle celle (migliore assorbimento della radiazione solare), che per migliorare la tensione di circuito aperto. Pertanto sono state sviluppate celle fotovoltaiche polimeriche aventi come materiale attivo una blend di un copolimero benzoditiofene-tienotiofene e un derivato del fullerene C70. Sono state affrontate le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi. I migliori dispositivi (non incapsulati) hanno raggiunto un'efficienza di conversione del 4,5%, ma si prospettano margini di miglioramento, caratterizzando gli stessi in un ambiente controllato.

Inoltre sono state investigate tecnologie di stampa (inkjet printing) per la deposizione dello strato attivo allo scopo di valutare se le caratteristiche di tali materiali sono idonee alla processabilità degli stessi tramite tecniche industrializzabili, che possano operare su larga area, con un'elevata velocità

A. Sviluppo e realizzazione di strati assorbitori e drogati innovativi per celle a film sottile di silicio micromorfe

Lo scopo dell'obiettivo è quello di sperimentare materiali a base di silicio intrinseci e drogati che permettano di ottenere buone prestazioni per le celle tandem micromorfe, cercando al contempo di limitare il numero e lo spessore degli strati necessari alla fabbricazione del dispositivo. Infatti, nonostante l'ottima combinazione di gap ottiche dei materiali assorbitori utilizzati nelle celle micromorfe (silicio amorfo nella cella anteriore e silicio microcristallino nella cella posteriore), permangono dei fattori che limitano le prestazioni e/o i costi dei dispositivi. Il silicio amorfo, infatti, presenta il problema del degrado dell'efficienza con l'illuminazione, mentre le proprietà ottiche del silicio microcristallino fanno sì che sia necessario utilizzare spessori consistenti di materiale attivo (almeno 2 μm) nella cella posteriore. E' stato, allora, proposto di sviluppare nuovi materiali che potenzialmente consentano di superare le attuali limitazioni. In particolare sono stati studiati materiali a base di nanoparticelle di silicio in una matrice di ossido di silicio da impiegare come strati assorbitori nella cella anteriore, mentre l'utilizzo di film di silicio germanio microcristallino è stato proposto in vista di un loro impiego come strati assorbitori nella cella posteriore. Per quanto riguarda poi lo sviluppo di strati drogati di nuova generazione, è continuato il lavoro, già avviato con successo durante la precedente annualità, relativo all'utilizzo di film a base di ossido di silicio a fase mista di tipo n nei dispositivi. Nei prossimi tre paragrafi sono riportati i risultati conseguiti.

Lo scopo dell'obiettivo è quello di sperimentare materiali a base di silicio intrinseci e drogati che permettano di ottenere buone prestazioni per le celle tandem micromorfe, cercando al contempo di limitare il numero e lo spessore degli strati necessari alla fabbricazione del dispositivo. Infatti, nonostante l'ottima combinazione di gap ottiche dei materiali assorbitori utilizzati nelle celle micromorfe (silicio amorfo nella cella anteriore e silicio microcristallino nella cella posteriore), permangono dei fattori che limitano le prestazioni e/o i costi dei dispositivi. Il silicio amorfo, infatti, presenta il problema del degrado dell'efficienza con l'illuminazione, mentre le proprietà ottiche del silicio microcristallino fanno sì che sia necessario utilizzare spessori consistenti di materiale attivo (almeno 2 μm) nella cella posteriore. E' stato, allora, proposto di sviluppare nuovi materiali che potenzialmente consentano di superare le attuali limitazioni. In particolare sono stati studiati materiali a base di nanoparticelle di silicio in una matrice di ossido di silicio da impiegare come strati assorbitori nella cella anteriore, mentre l'utilizzo di film di silicio germanio microcristallino è stato proposto in vista di un loro impiego come strati assorbitori nella cella posteriore. Per quanto riguarda poi lo sviluppo di strati drogati di nuova generazione, è continuato il lavoro, già avviato con successo durante la precedente annualità, relativo all'utilizzo di film a base di ossido di silicio a fase mista di tipo n nei dispositivi.

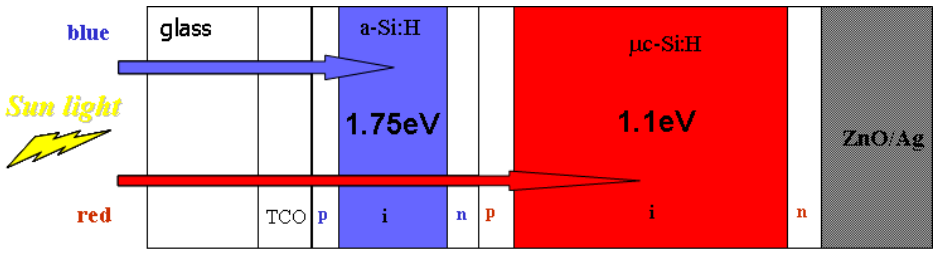


Figura 131. Schema di una cella tandem micromorfa "classica" che utilizza silicio amorfo e silicio microcristallino come materiali assorbitori rispettivamente nella cella anteriore e posteriore

A.1 Proprietà di film nanostrutturati di silicio in matrice di ossido di silicio e loro utilizzo come strati assorbitori innovativi

Il degrado del silicio amorfo (a-Si:H) con l'illuminazione comporta la necessità di ridurre lo spessore di tale strato utilizzato nella componente frontale della cella micromorfa con conseguente limitazione della corrente ottenibile da tale componente. In quest'attività si punta quindi ad indagare la possibilità di sostituire questo materiale con un semiconduttore artificiale a gap simile, realizzato sfruttando le proprietà di confinamento quantistico delle nanostrutture (in particolare la possibilità di modulare la bandgap variando la dimensione delle nanoparticelle). L'idea è quella di fabbricare quantum dot di silicio in una matrice dielettrica sufficientemente ravvicinati di modo che la sovrapposizione delle funzioni d'onda per gli stati permessi formi ampie mini-bande e quindi globalmente venga realizzato un materiale a gap efficace più alta di quella del silicio bulk (1,1 eV). Aspetto fondamentale per l'attività proposta è la richiesta di trovare regimi di deposizione dei materiali che consentano la formazione di nanostrutture direttamente in fase di crescita alle usuali temperature utilizzate per la realizzazione dei dispositivi

(150-200 °C). L'utilizzo di basse temperature di processo, infatti, è uno dei principali vantaggi della tecnologia di fabbricazione dei moduli a film sottile di silicio, vantaggio che verrebbe in tal modo conservato.

Nel corso delle precedenti annualità era stata indagata la possibilità di ottenere quantum dot di Si dispersi in varie tipologie di matrici con lo scopo di testare materiali che offrissero diverse altezze di barriera di energia tra le nanostrutture e la matrice, altezza da cui dipende la probabilità di tunnel degli elettroni. Dagli studi eseguiti era stata rivelata la difficoltà di crescere in-situ nanoparticelle di Si in matrici di nitruro e carburo di silicio, mentre risultati molto incoraggianti erano stati ottenuti nel caso di matrice di ossido di Si (SiO_x:H). Questi ultimi materiali, inizialmente studiati nell'ambito dell'attività sullo sviluppo di film drogati di ossido di silicio da utilizzare come strati drogati alternativi in celle micromorfe (vedi obiettivo A.3), avevano mostrato attraverso analisi strutturali una separazione di fase con nanocristalli di silicio in una matrice di SiO_x:H. Nel corso di questa annualità si è deciso di approfondire lo studio delle proprietà strutturali e ottiche dei film di SiO_x:H per avere ulteriori conferme circa gli effetti di confinamento quantistico in tali materiali. I risultati di seguito descritti sono relativi a campioni drogati, ma possono essere estesi anche a campioni di tipo intrinseco, in quanto il drogaggio non influenza l'eventuale separazione di fase, come riportato in diversi articoli di letteratura. I materiali intrinseci e drogati sono poi stati testati in strutture di tipo p-i-n per valutarne l'applicabilità ai dispositivi.

Sono stati depositati film di SiO_x:H mediante tecnica PECVD a bassa temperatura (T=150 °C) a partire da una miscela di gas costituita da silano (SiH_4), idrogeno (H_2) e biossido di carbonio (CO_2). Il drogaggio viene ottenuto aggiungendo fosfina (PH_3) alla miscela di gas. Variando il rapporto tra i gas sorgenti di silicio e ossigeno (SiH_4 e CO_2 rispettivamente) è possibile ottenere film caratterizzati da differente stechiometria, quindi più o meno ricchi di silicio, il che significa ottenere materiali con differenti proprietà. Inoltre sono state utilizzate due diverse pressioni di lavoro (1,9 e 3 torr), in modo da valutare le proprietà dei film depositati in due differenti regimi, caratterizzati da diverse velocità di crescita (0,3 Å/s al più basso valore di pressione e 0,8 Å/s a 3 torr). In Figura 132a e 132b sono mostrate le immagini ottenute mediante la tecnica della Microscopia Elettronica in Trasmissione Filtrata in Energia (EFTEM) su due campioni depositati alla pressione di 3 torr (campione A) e di 1,9 torr (campione B), e CO_2/SiH_4=3. Dalle immagini è evidente una pronunciata separazione di fase per entrambi i campioni con formazione di cluster di silicio di natura cristallina, come rivelato dai pattern di diffrazione elettronica mostrati negli inserti delle figure. L'alta diluizione di idrogeno utilizzata per crescere i materiali (H_2/SiH_4=200) favorisce probabilmente la separazione di fase mediante un meccanismo di crescita già proposto per il silicio microcristallino. La Figura 132c riporta quantitativamente la distribuzione delle dimensioni dei nanocristalli di silicio: il diametro medio e la densità superficiale sono 2,8 nm e 12.2 x 10^{12} dot/cm^2 per il campione A (3 torr) e 2,5 nm e 8,9 x 10^{12} dot/cm^2 per il campione B (1,9 torr), con un'ampia dispersione delle dimensioni in entrambi i casi. I valori ottenuti per i due film sono, quindi, molto simili con una leggera riduzione delle dimensioni e della densità dei cluster con la pressione.

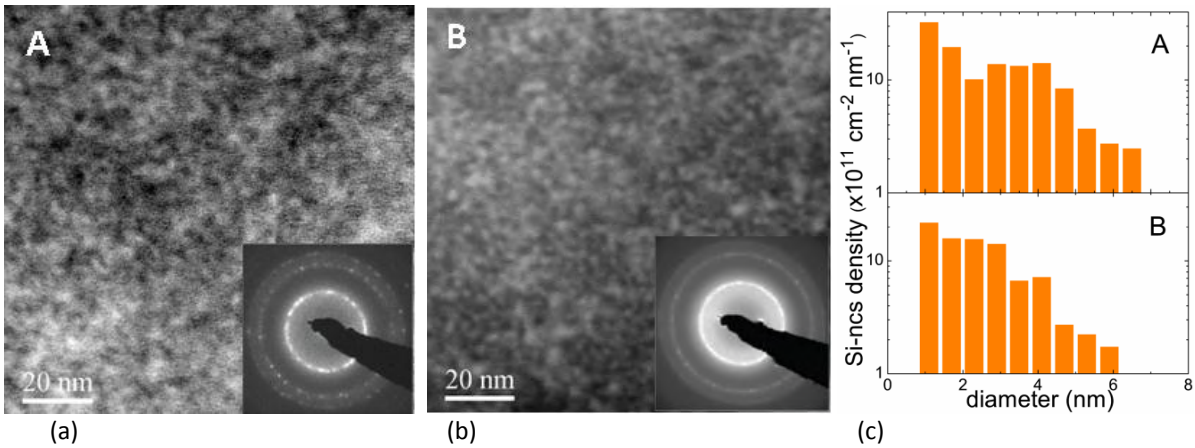


Figura 132. (a) e (b) Immagini EFTEM e pattern di diffrazione elettronica per i campioni A e B; (c) distribuzione delle dimensioni dei cluster di Si nei campioni valutata dalle immagini

I film hanno mostrato fotoluminescenza a temperatura ambiente (Figura 133): sono state osservate due bande nell'intervallo 550-650 nm e 650-800 nm, come spesso riportato in letteratura per quantum dot di Si in matrice di ossido di silicio. La banda a minore lunghezza d'onda è attribuita alla presenza di stati di difetto nella matrice. La banda nella regione rossa può essere, invece, dovuta a fenomeni di confinamento quantistico nei nanocristalli di Si con emissione dovuta a ricombinazione di coppie elettrone-lacuna. L'energia di emissione è compatibile con dati di letteratura relativi a quantum dot di silicio di diametro di circa 2,5 - 3 nm. Tuttavia l'interpretazione di tale picco

di fotoluminescenza è controversa in quanto altri fenomeni fisici possono essere alla base dell'effetto di fotoluminescenza e quindi non necessariamente la lunghezza d'onda di tale picco può fornire la bandgap dei nanocristalli di silicio.

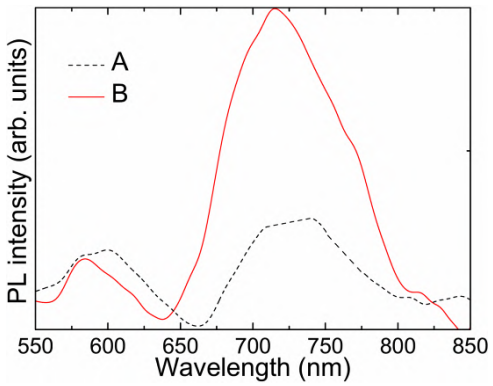


Figura 133. Spettri di fotoluminescenza a temperatura ambiente dei due film cresciuti a valori differenti di pressione

Per avere una valutazione più affidabile della gap dei nanocristalli di Si (Si-ncs) si è utilizzata la tecnica ellissometrica. Tale tecnica è molto potente in quanto, adottando opportuni modelli, consente di accedere in maniera non distruttiva alle proprietà ottiche non solo del materiale composito nella sua globalità ma anche delle singole componenti, persino su scala nanometrica. Le costanti ottiche dei Si-ncs per i due campioni A e B sono riportate in Figura 134 Nella stessa figura sono mostrati anche i valori tabulati delle costanti ottiche del silicio cristallino (Handbook of Optical Constants of Solids, edited by Palik, 1985). Si può notare che le costanti ottiche del c-Si sono caratterizzate da due picchi dovuti alle transizioni dirette banda-banda, mentre nel caso dei Si-ncs si evidenzia un singolo picco. Ciò è dovuto all'allargamento e sovrapposizione dei picchi del c-Si, così come riportato in letteratura per nanocristalli di silicio di piccole dimensioni in diverse matrici. Dal fit ellissometrico è stata valutata la gap ottica Eg dei nanocristalli: i campioni A e B presentano rispettivamente un valore di Eg pari a 2,02 eV e 2,33 eV. Tali valori sono ben al di sopra della gap del silicio cristallino e questo può essere dovuto ad un effetto di confinamento quantistico, in accordo con le previsioni teoriche di modelli a confinamento quantistico (inserto della Figura 134).

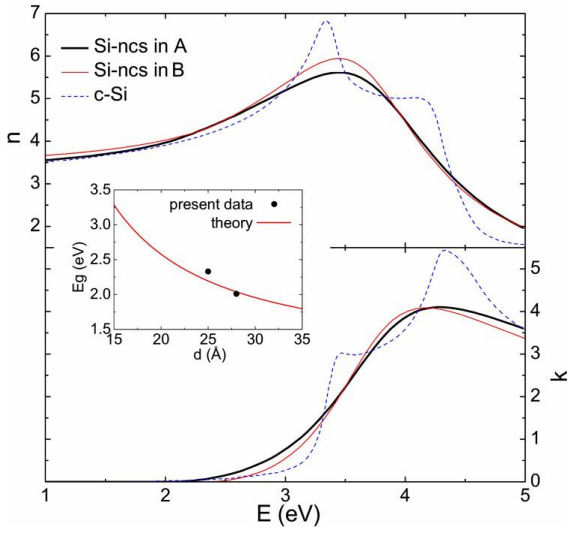


Figura 134. Costanti ottiche dei nanocristalli di silicio (Si-ncs) presenti nei due film cresciuti a differenti valori di pressione confrontati con i dati tabulati del c-Si. Inserto: Bandgap dei nanocristalli di Si in funzione del diametro (la linea continua è la dipendenza teorica da A. Zunger and L.-W. Wang: Appl. Surf. Sci. 102 (1996) 350)

Per ottenere un buon fit delle misure ellissometriche la matrice di ossido di silicio è stata descritta utilizzando i dati tabulati per il monossido di silicio (SiO) per entrambi i campioni. La matrice di SiO è caratterizzata da una bandgap di 2,3 eV, valore molto più basso rispetto a quello del SiO_2 (≈9 eV). Il materiale depositato presenta, dunque, una barriera di energia tra i dot di Si e la matrice piuttosto bassa e ciò può essere vantaggioso nella prospettiva di un suo utilizzo nei dispositivi.

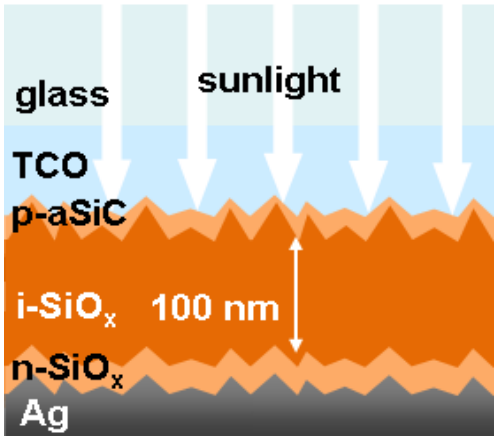


Figura 135. Schema di una cella solare p-i-n con strato assorbitore realizzato utilizzando quantum dot di Si in matrice di ossido di silicio

Nella fase finale delle attività si è provveduto a verificate le potenzialità di utilizzo dei film di ossido di silicio con inclusioni di nanostrutture di silicio nei dispositivi di tipo p-i-n. Sono state fabbricate celle solari secondo lo schema di fabbricazione riportato in Figura 135. Un film convenzionale di silicio-carbonio amorfo è stato utilizzato come strato p, mentre per lo strato intrinseco, di spessore pari a 100 nm, e per lo strato drogato n è stato utilizzato l'ossido di silicio a fase mista.

Nella Figura 136 sono riportate la caratteristica I-V (a) e la misura dell'efficienza quantica (b) di un dispositivo del tipo descritto. Per confronto nella Figura 136b è riportata anche la misura dell'efficienza quantica di un dispositivo p-i-n "classico" con strato assorbitore in silicio amorfo di spessore pari a 260 nm. Sebbene i due dispositivi siano caratterizzati da spessori differenti, è evidente che le prestazioni del dispositivo con i-SiO_x sono molto peggiori rispetto al dispositivo classico. Anche la caratteristica I-V fornisce valori di J_{SC}, V_{OC} e FF ben al di sotto dei valori ottenibili nel caso standard. La bassa risposta spettrale misurata e di conseguenza la bassa corrente di corto circuito della cella sono principalmente una conseguenza delle non ottimali proprietà ottiche dei materiali realizzati. I film sono, infatti, piuttosto trasparenti e il loro coefficiente di assorbimento è decisamente inferiore a quello del silicio amorfo. Probabilmente anche le proprietà elettriche dei film non sono ancora tali da consentirne l'utilizzo nei dispositivi. I nostri film, infatti, sono piuttosto disomogenei sia in termini di dimensioni delle nanostrutture di silicio che in termini di distribuzione delle stesse nanostrutture all'interno della matrice. Tale struttura disomogenea causa probabilmente una scarsa qualità elettronica del materiale assorbitore. Studi teorici riportati in letteratura mostrano, infatti, la necessità di utilizzare per i dispositivi materiali nanostruttutati in cui i dot di Si abbiano dimensioni regolari e siano posti a distanze fisse e determinate gli uni dagli altri, realizzando quindi un reticolo regolare di dot all'interno della matrice. Questo tipo di struttura, tuttavia, può essere realizzato solo mediante processi di fabbricazione complessi seguiti da trattamenti termici ad altissime temperature (>1000 °C). Nel nostro caso la necessità di salvaguardare l'economicità del processo realizzativo ha determinato la scelta di studiare processi di deposizione a bassa temperatura che consentano la formazione di nanostrutture direttamente in fase di crescita, ma ciò evidentemente pone dei limiti alla qualità elettronica dei materiali ottenibili. L'attività svolta, comunque, ha mostrato la possibilità di fabbricare dispositivi utilizzando film nanostrutturati di silicio in matrice di ossido di silicio ottenuti con processi a bassa temperatura. Le prestazioni delle celle solari sono in linea con lo stato dell'arte della ricerca in tale settore.

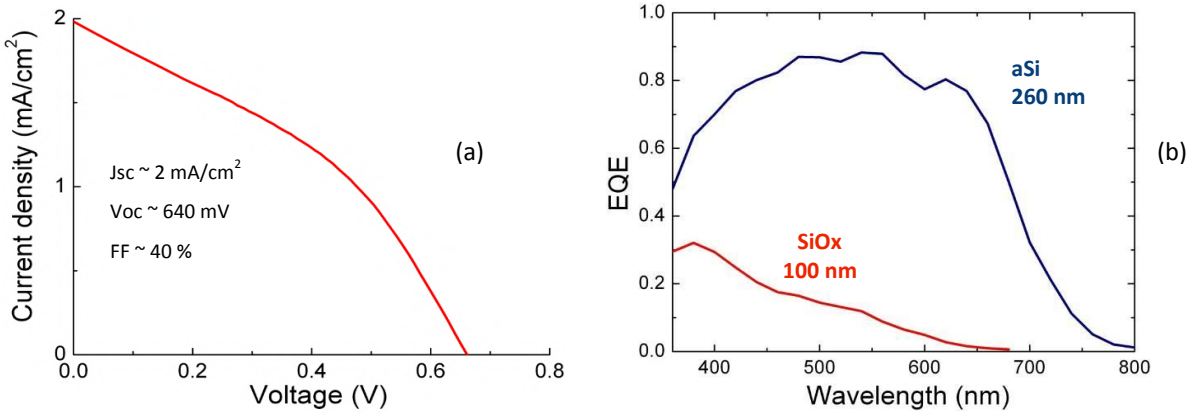


Figura 136. Curva caratteristica I-V (a) e misura dell'efficienza quantica esterna (b) per un dispositivo con strato assorbitore realizzato con ossido di silicio a fase mista (spessore 100 nm). Per confronto è riportata anche la EQE di un dispositivo standard con strato intrinseco in a-Si:H di spessore pari a 260 nm

A.2 Strati assorbitori alternativi a base di film microcristallini di silicio germanio

Le potenzialità di riduzione dei costi di fabbricazione dei moduli a film sottile devono essere ancora del tutto dimostrate per la tecnologia delle celle micromorfe. In tal caso infatti il dispositivo è costituito da due giunzioni di tipo p-i-n poste in serie, che significa dover depositare una sequenza di almeno sei strati attivi. Lo strato più critico in termini di costi è quello in silicio microcristallino (μc-Si:H) che costituisce lo strato assorbitore della cella

posteriore. Tale strato deve essere spesso alcuni micron per garantire un efficace assorbimento della componente rossa dello spettro solare. Lo strato di μc-Si:H può essere considerato un collo di bottiglia del processo produttivo e può costituire un limite alla penetrazione industriale di tale tecnologia. Sarebbe allora auspicabile trovare un materiale assorbitore alternativo, caratterizzato da un migliore assorbimento della radiazione solare rispetto al silicio microcristallino. Aggiungendo atomi di germanio ai film di μc-Si:H, si realizza una lega di silicio germanio microcristallino (μc-$Si_{1-x}Ge_x$:H). Questa lega possiede le potenzialità per ottenere un miglior coefficiente di assorbimento rispetto al silicio microcristallino. Nel corso della scorsa annualità è stato implementato il sistema di deposizione per poter depositare la lega silicio-germanio e sono stati depositati e caratterizzati i primi campioni di μc-$Si_{1-x}Ge_x$:H. I test preliminari mostravano che i film erano probabilmente caratterizzati da un'alta concentrazione di difetti e ciò poteva rappresentare un limite per il loro utilizzo nelle celle solari. Nel corso della presente annualità sono stati approfonditi gli studi sui materiali grazie anche alla possibilità di utilizzare il banco della Spettroscopia a deflessione fototermica (PDS), acquisito e installato lo scorso anno, che consente di stimare la concentrazione dei difetti, tramite la valutazione dell'assorbimento dei materiali a valori di energia inferiori alla gap. Sono state poi testate le potenzialità del materiale in dispositivi p-i-n.

I campioni di μc-$Si_{1-x}Ge_x$:H sono stati depositati con tecnica Very High Frequency PECVD a 100 MHz su substrati di vetro riscaldati a 150 °C. La miscela di gas è costituita da silano (SiH_4), germano (GeH_4) e idrogeno (H_2). Il contenuto di germanio nei film è stato controllato variando il rapporto R=GeH_4/(GeH_4+SiH_4) nell'intervallo 0-20%. Sono state depositate due serie di campioni a vario contenuto di germanio utilizzando due diverse diluizioni di idrogeno (H_2/SiH_4=40 e 100), mentre la pressione e la potenza della scarica sono state fissate rispettivamente a 500 mtorr e 20 W. I parametri sono stati scelti sulla base delle ricette standard messe a punto in ENEA per la crescita di silicio microcristallino. E' stata tuttavia incrementata la diluizione di idrogeno per favorire la crescita di fase ordinata, bilanciando l'effetto negativo su tale fase dovuto all'introduzione di atomi di germanio. Infatti l'incorporazione di atomi di Ge può indurre la creazione di stati di difetto e stati accettori che possono deteriorare la fase cristallina dei campioni, inficiando le qualità elettroniche del materiale. Gli spettri Raman delle due serie di campioni ottenute con diversa diluizione di H_2 (Figura 137) mostrano l'evoluzione strutturale dei film al variare del rapporto R= GeH_4/(GeH_4+SiH_4). All'aumentare del rapporto GeH_4/(GeH_4+SiH_4) si nota uno shift del picco a 520 cm^{-1} caratteristico del legame Si-Si nella fase cristallina, attribuibile alla presenza di atomi di Ge nei domini di silicio cristallino. Si possono notare, inoltre, due altri contributi a circa 400 cm^{-1} e 300 cm^{-1} dovuti rispettivamente al legame Si-Ge e al legame Ge-Ge. Il picco a 300 cm^{-1} è leggermente spostato a più bassi numeri d'onda rispetto al caso del germanio cristallino a causa della presenza di atomi di Si nei domini di germanio. Nella serie a bassa diluizione di idrogeno si osserva un allargamento e spostamento del picco a 400 cm^{-1} verso numeri d'onda più bassi per i campioni cresciuti ad alti valori di R, ciò è dovuto alla transizione verso una struttura amorfa del materiale.

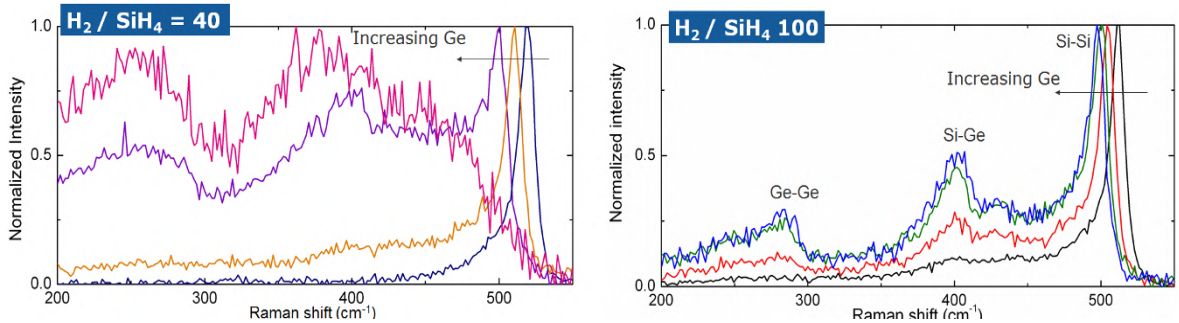


Figura 137. Spettri Raman delle due serie di campioni (H_2/SiH4 = 40 e H_2/SiH_4= 100) ottenuti variando il rapporto R= GeH_4/(GeH_4+SiH_4)

Nella Figura 138 sono mostrati gli spettri di assorbimento delle due serie di campioni ricavate da misure di trasmittanza e riflettanza. All'aumentare del numero di atomi di Ge nella lega (valori crescenti del rapporto R) si osserva uno spostamento verso il rosso degli spettri. Il parametro E_{04} (energia alla quale il coefficiente di assorbimento è 10^4 cm^{-1}) decresce dal valore 2,05 eV per il silicio microcristallino a 1,76 eV e 1,71 eV per i film μc-$Si_{1-x}Ge_x$:H con il più alto contenuto di Ge cresciuti rispettivamente con H_2/SiH_4= 40 e H_2/SiH_4= 100. Tali dati confermano le promettenti proprietà ottiche dei materiali in vista del loro utilizzo nei dispositivi.

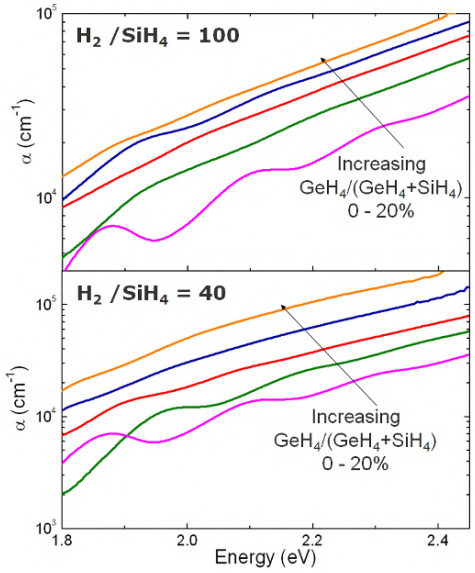


Figura 138. Spettri di assorbimento al variare del rapporto R = $GeH_4/(GeH_4+SiH_4)$ per le serie a H_2/SiH_4= 40 e H_2/SiH_4= 100

Sono state anche investigate le proprietà elettriche dei film, misurando la conducibilità in condizioni di buio (σ_D) e sotto illuminazione (σ_L). Per la serie a più bassa diluizione di idrogeno (H_2/SiH_4=40) i valori di σ_D sono nell'intervallo 10^{-6} - 10^{-7} S/cm, mentre valori più alti (10^{-4} - 10^{-5}) sono stati valutati per la serie caratterizzata da H_2/SiH_4=100. I valori di conducibilità di buio misurati ad alta diluizione di idrogeno sono indicativi di un materiale estremamente difettato e ciò è avvalorato anche dalla scarsa fotoconducibilità (σ_L/σ_D<10) rilevata per tale serie.

La misura di spettroscopia a deflessione fototermica è stata utilizzata per avere informazioni sulla presenza di difetti nei campioni. Nella Figura 139 sono mostrati gli spettri del coefficiente di assorbimento (α) per due campioni della serie a bassa diluizione di idrogeno. Nella regione a bassa energia (<1 eV) le curve cominciano ad appiattirsi a valori di α di circa 10 cm^{-1}, valori che sono un ordine di grandezza maggiore rispetto a quelli tipici misurati per il µc-Si:H di buona qualità. Ciò è probabilmente dovuto alla presenza di stati di difetto che contribuiscono all'assorbimento in tale intervallo di energia.

Dallo studio delle proprietà dei film di silicio germanio microcristallino è evidente, dunque, che i materiali presentano promettenti proprietà ottiche, ma non altrettanto promettenti appaiono le proprietà elettriche. Si è comunque proceduto alla realizzazione di dispositivi p-i-n, utilizzando come materiale assorbitore film di silicio germanio microcristallino della serie a bassa diluizione di idrogeno. Sono stati utilizzati film caratterizzati da diverso contenuto di germanio e i dispositivi realizzati sono stati confrontati con una cella standard in silicio microcristallino. Lo spessore dello strato intrinseco delle celle è pari a 500 nm. Dalla misura della caratteristica I-V si evidenziano prestazioni peggiori per le celle in µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H rispetto alla cella standard: sono state misurati valori di V_{OC} di circa 300 mV e FF inferiori al 50% per le celle in silicio germanio rispetto ai valori di 450 mV e 60% misurati per le celle in µc-Si:H. La corrente di corto circuito valutata dalla misura di efficienza quantica (Figura 140) è pari a 14,7 mA/cm^2 per la cella standard e decresce a 12,4 mA/cm^2 e 13,6 mA/cm^2 per le celle in µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H depositate rispettivamente a R = 9% e 17%. Come si vede dalla figura l'efficienza quantica delle celle in Si-Ge è peggiore rispetto alla cella test in gran parte dell'intervallo spettrale e non si osserva lo sperato miglioramento alle alte lunghezze d'onda. Nonostante le promettenti proprietà ottiche, dunque, dobbiamo ipotizzare che l'alta concentrazione di difetti presenti nel materiale determini una riduzione del campo elettrico nella regione intrinseca tale da causare rilevanti fenomeni di ricombinazione delle cariche fotogenerate

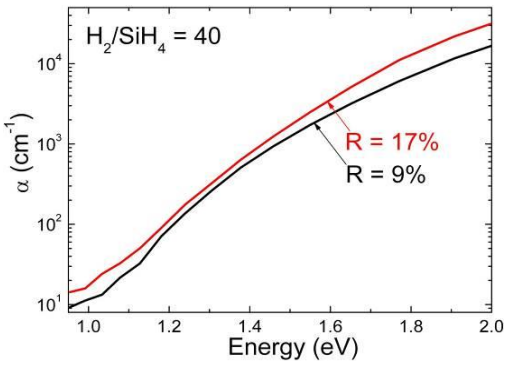


Figura 139. Spettri di assorbimento valutati tramite spettroscopia a deflessione fototermica per campioni di µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H depositati a R = 9% e R = 17%, utilizzando bassa diluizione di idrogeno

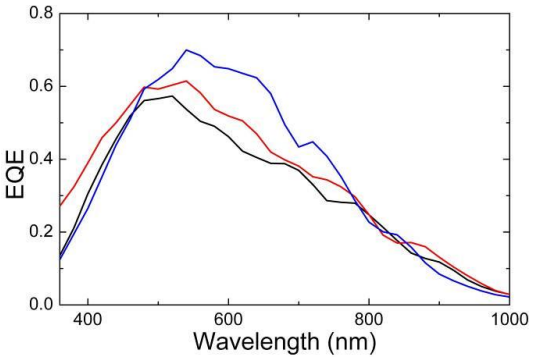


Figura 140. Risposta spettrale di due dispositivi con strato assorbitore in µc-$Si_{1-x}Ge_x$:H cresciuti con R= 9% (linea nera) e R= 17% (linea rossa) e di una cella standard in µc-Si:H (linea blu)

In conclusione si può affermare che l'obiettivo dell'attività è stato raggiunto, infatti sono stati depositati e caratterizzati film di silicio germanio microcristallino e sono state valutate le prestazioni di celle solari realizzate utilizzando strati assorbitori di silicio germanio. Tuttavia, nonostante siano stati studiati diversi regimi di crescita, i problemi di difettosità del materiale già rilevati nella scorsa annualità permangono e ciò pone dei dubbi sul

prosieguo dell'attività. E' attualmente in programma una verifica delle condizioni operative del sistema di deposizione (purezza del gas sorgente, pulizia delle linee) e a valle di tali controlli si deciderà se continuare o meno la linea di ricerca sulla lega silicio-germanio.

A.3 Sviluppo di celle tandem micromorfe sottili (< 1 μm)

La possibilità di realizzare celle micromorfe molto sottili (spessori <1 μm), caratterizzate da adeguate prestazioni, è la sfida più rilevante della ricerca in tale settore. Ciò consentirebbe alle industrie di aumentare il volume di produzione dei moduli, riducendo il loro costo di fabbricazione. Per conseguire tale risultato è necessario realizzare un efficace intrappolamento della radiazione solare. Come verrà discusso nel paragrafo relativo all'obiettivo B, diverse sono le soluzioni che si stanno studiando per ottenere il cosiddetto "light trapping", una delle quali coinvolge l'ottimizzazione del riflettore posteriore della cella. Nel corso della precedente annualità era stato evidenziato come film sottili di ossido di silicio drogati n (n-Si_xO:H), depositati in opportune condizioni, potevano migliorare le prestazioni delle celle micromorfe se utilizzati come strati n nelle giunzioni in alternativa ai film standard di silicio microcristallino. In particolare era stato dimostrato che, utilizzando questi strati e completando la giunzione con un semplice film di Ag, era possibile ottenere prestazioni confrontabili con quelle ottenute con il riflettore standard costituito dal bilayer ZnO /Ag.

Nel corso della presente annualità si è lavorato all'ottimizzazione del contatto posteriore con lo scopo di realizzare dispositivi micromorfi molto sottili. Sulla base del lavoro svolto sullo studio delle proprietà ottiche ed elettriche dell'ossido di silicio drogato n, sono state selezionate due appropriate tipologie di materiali cresciute a differenti valori di pressione (1,9 e 2,5 torr). Il film depositato a 1,9 torr presenta una conducibilità di 5 x 10^{-3} S/cm ed un indice di rifrazione n = 2,4, mentre alla pressione di 2,5 torr σ = 0,2 S/cm e n= 2,6 (gli indici di rifrazione sono valutati a 800 nm). Quindi i campioni sono caratterizzati da simili proprietà ottiche e valori di conducibilità abbastanza differenti, sebbene entrambi idonei all'applicazione. Tali campioni sono stati utilizzati nella cella posteriore di dispositivi micromorfi di area pari a 1 cm^2 realizzati su substrati di vetro ricoperti di SnO_2 commerciale (Asahi U-type). Per confronto è stato realizzato anche un dispositivo con un film standard di silicio microcristallino (n=3,3 e σ = 0,2 S/cm). Come contatto posteriore sono state considerate due opzioni: un singolo strato di Ag oppure un bilayer di ZnO/Ag. Lo spessore degli strati assorbitori è 140 nm per la cella anteriore in a-Si:H e 720 nm per la cella posteriore in μc-Si:H, per uno spessore totale della cella di circa 1 μm (includendo anche gli strati drogati). Nella Figura 141 sono riportate le risposte spettrali delle celle. Le risposte spettrali delle celle anteriori che assorbono principalmente nella regione 360 - 800 nm sono molto simili in tutti i casi, mentre rilevanti differenze appaiono nelle risposte spettrali delle celle posteriori che assorbono la parte dello spettro solare nell'intervallo 500-1100 nm. Queste differenze sono, evidentemente, legate agli strati differenti utilizzati nella parte posteriore delle celle. Come ampiamente riportato in letteratura per celle fabbricate utilizzando strati convenzionali di silicio drogato n, l'utilizzo di un contatto posteriore costituito da ZnO/Ag dovrebbe incrementare la risposta spettrale della cella posteriore rispetto al caso in cui venga utilizzato un semplice strato di Ag.

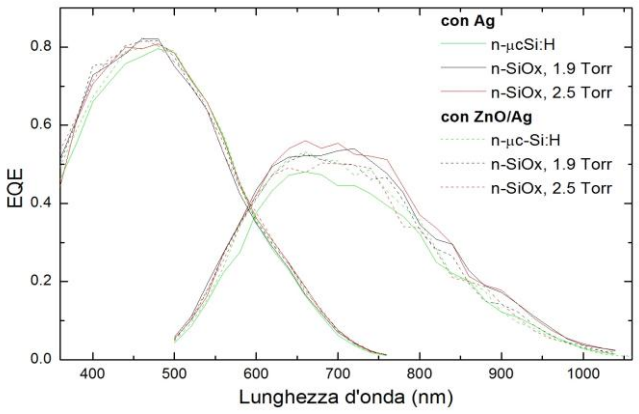


Figura 141. Efficienza quantica esterna (EQE) per le celle con contatto posteriore in Ag (linee continue) e ZnO/Ag (linee tratteggiate) per le celle con differenti strati n

Infatti l'uso di uno strato buffer di ZnO, caratterizzato da un indice di rifrazione (n circa 1,9) minore di quello del silicio, consente di evitare le perdite dovute all'assorbimento all'interfaccia silicio/ metallo causato dall'eccitazione di polaritoni plasmonici di superficie. In effetti la risposta spettrale delle celle il cui contatto posteriore è realizzato con ZnO/Ag (curve tratteggiate) sono migliori della EQE della cella realizzata con n-μcSi:H standard (linea continua verde). Tuttavia le migliori risposte spettrali sono state osservate applicando lo strato n innovativo in ossido di silicio e utilizzando un semplice strato di Ag come contatto posteriore. Quindi si può affermare che l'utilizzo dello strato n-SiO_x, caratterizzato da un indice di rifrazione minore del silicio, consente di evitare l'introduzione dell'ulteriore strato buffer in ZnO, disaccoppiando esso stesso il silicio dal metallo. Inoltre per spiegare l'ulteriore incremento della efficienza quantica nella configurazione nSiO_x/Ag è stata ipotizzata l'eccitazione di plasmoni localizzati di superficie sulla superficie rugosa dell'argento. Tale fenomeno indurrebbe effetti di amplificazione della luce riflessa verso la cella che, a causa all'assenza dell'ulteriore strato di ZnO, riuscirebbe a raggiungere lo strato intrinseco e ad essere in buona parte assorbita dalla cella. Questi fenomeni sono attualmente in fase di studio.

Nella Tabella 26 sono riportati i parametri fotovoltaici ottenuti dalla misura della caratteristica I-V (V_{OC} e FF), dalla misura di EQE (J_{SCtop} e $J_{SCbottom}$) e i valori calcolati per l'efficienza (η). Utilizzando lo strato n innovativo con il singolo strato di Ag, è stato ottenuto un incremento della corrente di corto circuito nella cella posteriore pari circa al 10% rispetto al caso della cella con n standard e contatto posteriore realizzato con ZnO/Ag. L'efficienza massima raggiunta è pari a 9,4%, ma tale efficienza potenzialmente può migliorare in quanto il dispositivo non è matchiato in corrente (la corrente della cella componente anteriore è minore di quella della componente posteriore). Tale risultato in termini di prestazione è sicuramente rilevante in quanto è stato ottenuto su un dispositivo molto sottile (circa 1 μm).

Tabella 26. Parametri fotovoltaici delle celle solari micromorfe realizzate con differenti strati n e contatti posteriori

Cella	J_{SCtop} (mA/cm^2)	$J_{SCbottom}$ (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	FF (%)	η (%)
Con Ag					
n-μcSi:H	9,8	8,9	1,32	70,2	8,2
n-SiOx (1,9 Torr)	9,9	10,5	1,28	72,2	9,2
n-SiOx (2,5 Torr)	10,1	10,7	1,30	71,4	9,4
Con ZnO/Ag					
n-μcSi:H	10,0	9,7	1,32	70,0	9,0
n-SiOx (1,9 Torr)	10,1	9,9	1,27	71,5	9,0
n-SiOx (2,5 Torr)	10,0	9,7	1,29	70,4	8,8

In conclusione si può affermare che l'obiettivo fissato è stato raggiunto. Sono stati depositati e caratterizzati film nanostrutturati di Si in matrice di ossido di silicio e film di silicio-germanio microcristallino. Tali materiali sono stati testati come strati assorbitori in celle a singola giunzione p-i-n per valutarne l'applicabilità nelle celle tandem. Inoltre sono state realizzate celle micromorfe sottili (spessore totale di circa 1 μm) con efficienza massima pari a 9,4%, utilizzando un contatto posteriore semplicemente costituito da uno strato di Ag, grazie all'utilizzo di strati di tipo n innovativi realizzati in ossido di silicio a fase mista. Visti i buoni risultati ottenuti sullo sviluppo di strati drogati innovativi, si pensa nel futuro di estendere la ricerca allo sviluppo di strati di ossido di silicio di tipo p.

B. Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo a film sottile di silicio

Lo scopo di questa linea di ricerca è stato quello di studiare le possibili strade per la realizzazione di un efficace intrappolamento della radiazione solare all'interno del dispositivo. Il confinamento ottico della radiazione solare è, infatti, uno degli aspetti di maggiore rilevanza nella ricerca condotta sui dispositivi a film sottile in quanto può determinare un aumento dell'efficienza di conversione senza la necessità di utilizzare spessori elevati per gli strati assorbitori. Ciò avrebbe un grande impatto sul processo di produzione dei moduli, in quanto comporterebbe una riduzione del costo di fabbricazione. L'attività si è incentrata su:

- sviluppo di elettrodi frontali trasparenti;
- progettazione di riflettori posteriori innovativi costituiti da cristalli fotonici ibridi metallici e dielettrici;
- sviluppo di substrati nanostrutturati per migliorare il confinamento ottico.

B.1 Sviluppo di ZnO ad alta testurizzazione e deposizione di celle micromorfe

La strategia standard per il confinamento ottico della luce che entra nel dispositivo è sempre stata quella di utilizzare un ossido trasparente e conduttivo (TCO) con una rugosità controllata. Lo ZnO prodotto per LP-CVD è, in qualità di elettrodo frontale, uno dei migliori candidati per la produzione industriale di dispositivi a film sottili ad alta efficienza. La tecnica LP-MOCVD permette di depositare ossidi trasparenti e conduttivi ad elevate velocità di deposizione (fino a 40 Å/sec). Inoltre, essa è facilmente scalabile sulla larga area ed è in grado di crescere materiali naturalmente microrugosi (testurizzati), laddove questa particolare superficie è in grado di assicurare il confinamento ottico della luce nel dispositivo.

Negli anni precedenti sono stati sviluppati TCO "Full Haze" a base di ZnO prodotto mediante LP-CVD, processo che, accoppiato al trattamento post-deposizione mediante la tecnica del reactive ion etch (RIE), consente di modificare e controllare la rugosità superficiale. Questo tipo di substrati ha mostrato elevate proprietà di scattering in tutto l'intervallo spettrale di interesse della tecnologia delle celle micromorfe. Con riferimento a questa attività strategica, ulteriore lavoro di sperimentazione è stato condotto al fine di meglio comprendere ed ottimizzare il processo di induzione delle crescite macrorugose ed, allo stesso tempo, migliorare la ripetibilità del processo.

Lo ZnO "as grown" ha una superficie a grani piramidali con buone proprietà di scattering (valutate da misure di haze spettrale, definito come rapporto tra la trasmittanza diffusa e quella totale) soprattutto nella regione delle basse lunghezze d'onda. Tuttavia, ad alte lunghezze d'onda (0,65-1,1 μm) i valori di haze sono troppo bassi per produrre consistenti effetti di confinamento ottico nei dispositivi micromorfi. Partendo dalla considerazione che le dimensioni delle piramidi aumentano con lo spessore del film, la scelta di fabbricare film di ZnO di spessore maggiore non porta ad un sostanziale miglioramento dell'haze nell'intervallo delle alte lunghezze d'onda. Per questa ragione si è scelto di modificare la morfologia superficiale dello ZnO mediante wet etching in modo da ottenere un nuovo substrato con caratteristiche più adatte. Nella prima fase dell'attività sono stati definiti quali sono i parametri controllanti il processo di etching chimico condotto con soluzioni di acidi diluiti su film sottili di ZnO:B depositato con tecnica MOCVD, lavoro preliminare finalizzato all'ottenimento di un substrato con caratteristiche tali da garantire la formazione di superfici altamente testurizzate mediante la deposizione di un secondo strato di ZnO. Le caratteristiche dell'etching di ZnO policristallino orientato (110) sono state investigate sistematicamente utilizzando sia acidi forti come HCl, che deboli come H_3PO_4 ed HF al fine di capire l'effetto della natura dell'acido, l'influenza del pH e del tempo di etching sulle proprietà del film risultante. Riguardo all'etching in HCl da soluzioni a differente concentrazione, come appare in Figura 142.A, la rugosità delle superfici aumenta con il tempo di etching. Generalmente un processo di wet etching è controllato da due step: i) step di diffusione e ii) step di reazione, il primo dipendente dalla viscosità ed il secondo dalla reattività dello ione idronio (H_3O^+). Poiché le tre soluzioni testate di HCl hanno la stessa viscosità, possiamo affermare che è solo lo step di reazione che controlla la velocità di rimozione dello ZnO. A pH più bassi è più alta la quantità di ioni idronio forniti alla reazione e minore l'effetto di solvatazione con conseguente etching più elevato. Le soluzioni di H_3PO_4, avendo più alta viscosità, danno luogo ad un processo di etching limitato dalla diffusione che determina un aumento dell'etching verticale con accentuate cavità random (Figura 142.B immagine c). Le soluzioni di HF originano etching verticali e laterali simili all'H_3PO_4 con la formazione di crateri più piccoli dovuti alle piccole dimensioni della molecola di HF che è in grado di penetrare più profondamente nei difetti prima che avvenga la reazione chimica ad opera dello ione H_3O^+.

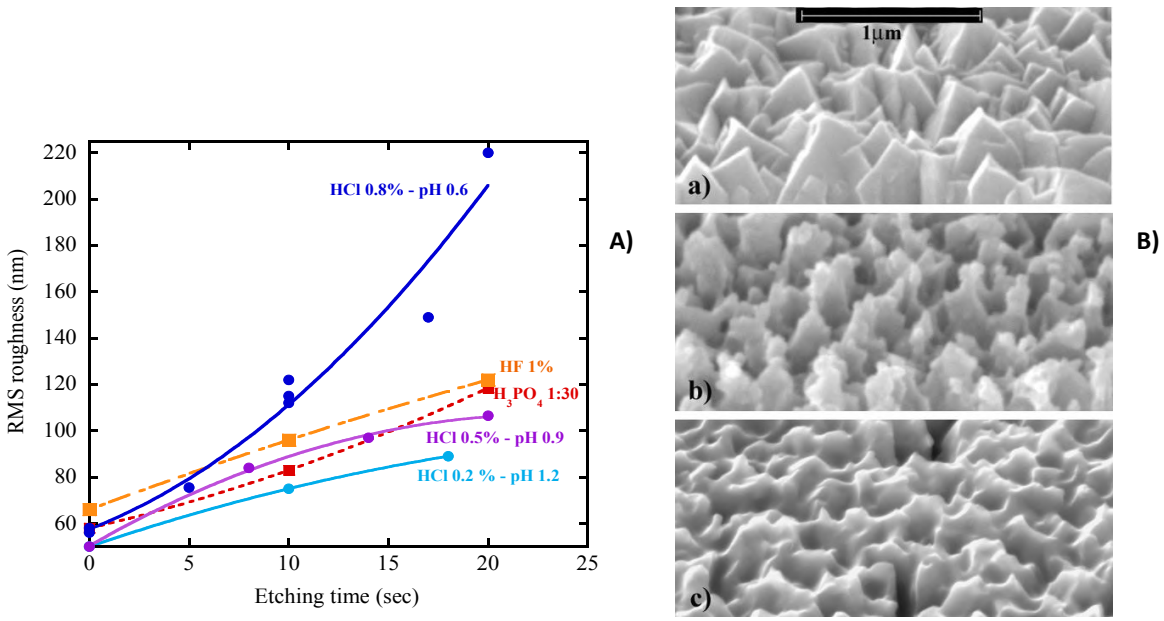


Figura 142. A) Rugosità delle superfici di ZnO in funzione del tempo di attacco in soluzioni diluite di acidi differenti (HF, H_3PO_4 e HCl) e di differente concentrazione. B) Immagini SEM della morfologia superficiale di film di ZnO a) "as grown", b) con attacco in HCl e c) con attacco in H_3PO_4

Le immagini SEM (Figura 142.B) mostrano chiaramente il cambio di morfologia superficiale da piramidale a crateri dopo l'attacco e soprattutto la differente morfologia ottenuta nel caso di attacco con acido debole (crateri uniformi e di bassa profondità) e con acido forte (strutture verticali o nanorods). La formazione di crateri uniformi nei film attaccati con acidi deboli può essere attribuita ad un processo limitato da diffusione con forte etching anisotropo che appiattisce il materiale di partenza, mentre la formazione di nanorods su film attaccati da soluzioni di HCl può essere attribuita ad un processo limitato da reazione con un forte attacco isotropo che preserva l'alto rapporto di aspetto del materiale di partenza. Inoltre, l'accrescimento del nanorods è favorito dalla formazione di

uno strato di idrossido di zinco sulle asperità della superficie attaccata con HCl durante il successivo lavaggio in acqua leggermente alcalina, il cui picco è evidenziato anche negli spettri di diffrazione ai raggi X

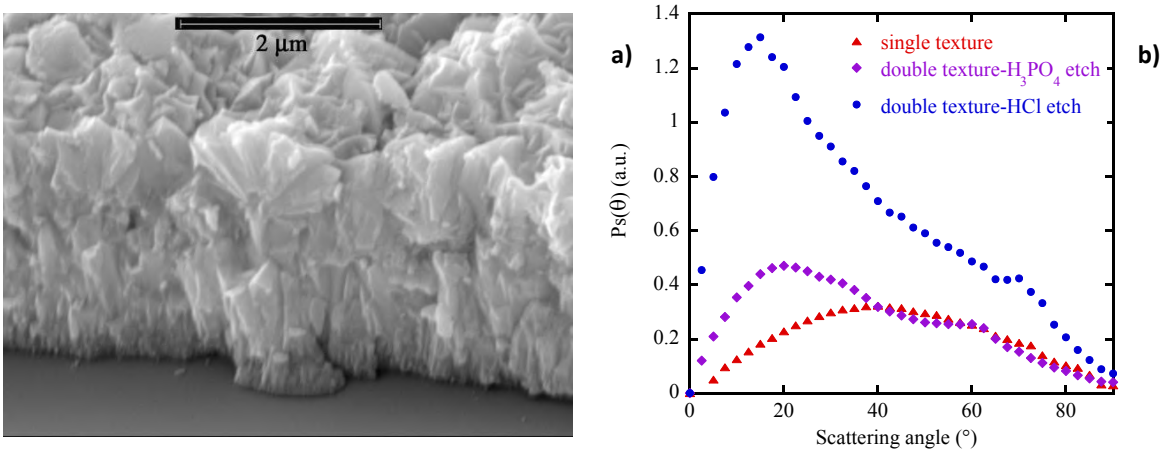


Figura 143. a) Vista in sezione di un film di ZnO a doppio strato dove è chiaramente evidente la crescita a ventaglio delle strutture a cavolfiore. b) Potenza di scattering derivata dalla intensità trasmessa misurata con tecnica ARS in funzione dell'angolo di scattering per il film a singolo layer e per film a doppio strato ottenuti su ZnO con attacco in HCl e H_3PO_4

Questo layer di idrossido ha la duplice funzione di interrompere la continuità cristallina e di agire da centro di nucleazione di crescite multidirezionali di grani cristallini. La struttura di un film a doppio strato è mostrata in Figura 143a. La superficie presenta due tipi di tessitura con larghi grani semisferici del tipo "cavolfiore" aventi dimensioni di circa 2 µm, coperti da piramidi più piccole. La rugosità RMS della struttura a doppio-strato è di 140 nm, notevolmente più alta della struttura piramidale a singolo strato (70 nm). La crescita di strutture a doppia tessitura si verifica solo su substrati sottoposti ad etching con soluzione di HCl la cui superficie si presenta costituita da nanorods ricoperti da idrossido di zinco, dove questi ultimi agiscono da siti di nucleazione di numerosi cristalliti colonnari in direzioni differenti di crescita. L'haze spettrale, misurato come rapporto tra la trasmittanza diffusa e quella totale, nelle strutture a doppia tessitura è più alto nell'intera regione ottica di interesse. Infatti, alla lunghezza d'onda di 800 nm, si passa dal 7% di haze della semplice struttura piramidale al 55% della doppia struttura. Per meglio caratterizzare la quantità di luce scatterata dallo ZnO a doppia struttura sono state effettuate misure di Angular Resolved Scattering (ARS), tecnica di misura già presente nei nostri laboratori che di recente è stata implementata sia con un motore di movimentazione di alta precisione, che con un programma di gestione automatico. Le misure ARS danno informazioni sulla distribuzione angolare della luce scatterata, a differenza del parametro di haze che dà indicazioni sulla quantità globale di luce scatterata dal materiale. Figura 143b è riportata la potenza scatterata, integrata rispetto all'angolo solido ed in funzione dell'angolo di scattering, per differenti strutture scatteranti. Lo strato singolo di ZnO testurizzato ha un comportamento molto prossimo ad un diffusore lambertiano (max a 45°) con un angolo di scattering preferenziale a circa 40°. Invece, le strutture a doppia testurizzazione mostrano diversi picchi di scattering sia a basso che ad alto angolo.

In particolare, la deconvoluzione dello spettro relativo alla struttura con grani a cavolfiore (ottenuta su substrato con etching in HCl) dà tre angoli preferenziali di scattering ad 11°, 24° e 53°. La larga componente di scattering a 53° è quella che contribuisce altamente all'effetto di light trapping nel dispositivo. Questo risultato conferma che film di ZnO a doppia testurizzazione sono molto promettenti come elettrodi frontali avendo proprietà di scattering adatte per elevati confinamenti ottici in dispositivi a film sottile di silicio nella regione ottica da 0,4 a 1,1 µm.

Celle solari tandem di tipo micromorfo sono state realizzate utilizzando substrati con elettrodo frontale di ZnO:B con struttura a doppia testurizzazione. La morfologia superficiale del film di ZnO:B è stata ottimizzata attraverso trattamenti di etching in plasma gassoso di argon in un apparato RIE, al fine di eliminare asperità superficiali e difetti che potessero compromettere l'interfaccia ZnO/p-Si:H ed influenzare le proprietà elettriche del dispositivo fotovoltaico. A tal proposito di recente è stata realizzata ed installata una nuova camera RIE in alluminio che può alloggiare substrati fino a 15 x 15 cm^2 (Figura 144) e quindi consentire anche trattamenti con gas più reattivi. Il dispositivo tandem realizzato (area 1 cm^2) è costituito da una cella anteriore con spessore dello stato intrinseco di 0.25 µm ed una cella posteriore di spessore 1,8 µm

Figura 144. Impianto per il reactive ion etch (RIE) con la nuova camera installata recentemente nei laboratori di Portici

In Figura 145 sono riportate a confronto le curve di efficienza quantica di due dispositivi identici realizzati su substrato di ZnO con doppia testurizzazione (linea blu) e su SnO_2 commerciale (linea rossa). Nella cella micromorfa con elettrodo frontale in ZnO si può notare un discreto aumento dell'efficienza spettrale della componente posteriore nella regione tra 650 e 1000 nm, confermando quindi che nel dispositivo realizzato su ZnO c'è un migliore intrappolamento della luce alle alte lunghezze d'onda. Questo risultato è confermato anche dalle riflettanze spettrali condotte sulle celle, le quali mostrano un maggiore assorbimento della radiazione già a partire da 600 nm e per tutto il range delle alte lunghezze d'onda. Si ritiene quindi che l'utilizzo di un elettrodo frontale a doppia testurizzazione sia la scelta giusta per migliorare il confinamento ottico nei dispositivi a film sottile di silicio. Il lavoro futuro prevedrà lo sviluppo di simulazione ottica per valutare l'effetto delle differenti morfologie superficiali sullo scattering della radiazione.

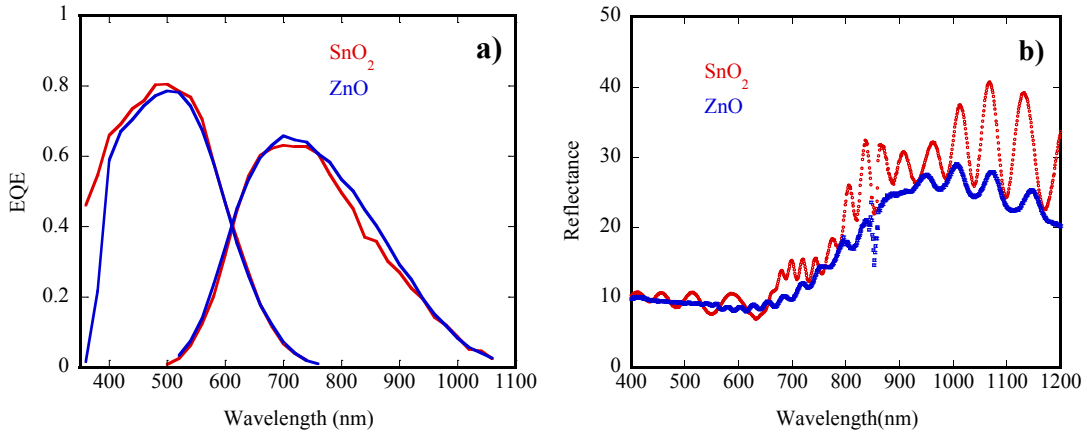


Figura 145. Confronto della risposta spettrale (a) e della riflettanza (b) misurata su celle tandem micromorfe realizzate su substrato con elettrodo frontale di SnO_2 (linea rossa) e ZnO con doppia testurizzazione (linea blu)

B.2 Deposizione di ZnO su larga area

L'ossido di zinco viene depositato mediante un impianto LP-MOCVD realizzato su progetto ENEA dalla ditta Elettrorava S.p.A. In un impianto LP-CVD l'ottenimento di un materiale TCO con proprietà "device quality" nasce dall'opportuna delineazione e progettazione degli elementi fondamentali del reattore quali il diffusore dei reagenti gassosi ed il riscaldatore. Infatti l'uniformità del trasporto di materia e l'uniformità di trasmissione del calore sul substrato, accoppiati ad un equilibrato svuotamento dei reagenti in camera, determinano la cinetica di crescita del film e quindi l'uniformità spaziale delle proprietà del materiale depositato. La camera del reattore è caratterizzata da un riscaldatore, a stretto contatto del quale è posizionato l'holder porta substrati, e da una unità di distribuzione dei reagenti gassosi formata da canali separati per i differenti gas utilizzati che diffondono verso il substrato. Una uniforme temperatura di riscaldamento del substrato consente la deposizione di film sottili di ossido di zinco su substrato di vetro fino ad una dimensione di 30 x 30 cm^2. L'uniformità del deposito è essenziale per la realizzazione di moduli fotovoltaici su larga area ed il diffusore dei reagenti è un elemento chiave ai fini dell'ottenimento di una buona uniformità sia dello spessore sia relativa alle proprietà elettriche e chimiche del

materiale depositato. Nel corso di questi anni il lavoro di sperimentazione condotto con il suddetto impianto MOCVD ha fornito dati molto interessanti sulla bontà delle proprietà ottiche, elettriche e strutturali del materiale fabbricato. Viceversa i dati sull'uniformità spaziale di deposito hanno mostrato mappe di spessore non ottimali rispetto all'obiettivo di industrializzazione del processo. Inoltre abbiamo potuto notare come questa disuniformità spaziale del deposito sia via via aumentata nel tempo. Ragione per cui, in questa annualità del progetto, è stato svolto ulteriore lavoro di sperimentazione per migliorare l'uniformità di deposizione e la produttività dell'impianto LP-CVD per la deposizione di ZnO drogato con boro su area 30 x 30 cm^2.

Le precedenti osservazioni sperimentali hanno indotto ad eseguire una verifica su alcuni componenti del reattore MOCVD, da cui sono risultate le seguenti anomalie :

- la cornice (holder), realizzata in acciaio e nella quale viene alloggiato il substrato di vetro, ha subito nel tempo delle notevoli deformazioni meccaniche a causa del ciclaggio termico a cui essa viene sottoposta durante i processi di deposizione; queste deformazioni inducono uno sbilanciamento nel posizionamento del substrato di vetro e della lastra di rame che lo ricopre;
- la lastra di rame (suscettore) che ricopre il substrato di vetro, riscaldata durante il processo ad una temperatura di circa 170 °C, tende a deformarsi distanziandosi dal substrato lungo l'intera periferia;
- il substrato di vetro, man mano che aumenta lo spessore del film depositato, tende ad acquisire forti tensioni con conseguente deformazione.

Tutto quanto sopra descritto è in grado di giustificare l'accentuata tendenza a depositi di film con eccessiva disuniformità spaziale. Per ovviare a questo problema è stato deciso di rivedere sia il disegno che la tipologia di materiali utilizzati per la realizzazione dell'holder e del suscettore.

Si è, quindi, deciso di utilizzare cornici in Ergal (materiale ad alta resistenza termica) e suscettore di rame a più elevato spessore (3,5 mm) in modo da limitarne la deformabilità.

Successivamente, sono state valutate le problematiche inerenti ad un altro elemento chiave dell'impianto, rappresentato dal distributore gas. La nostra scelta innovativa di distribuire uniformemente su una doccia i reagenti gassosi con diffusore lineare (asse x del reattore) e movimentare il substrato sull'altro asse, era stata ipotizzata come la migliore soluzione per ottenere buona uniformità e, di conseguenza, per garantire sia la scalabilità del processo a dimensioni grandi di substrato sia la possibilità di produzione in linea. La sperimentazione condotta per la messa a punto del processo di deposizione dello ZnO ha consentito di valutare le opportune modifiche da apportare al diffusore dei reagenti gassosi per ottenere più elevata uniformità di deposizione. In particolare è stato condotto un accurato studio per stabilire secondo quali criteri tale diffusore andava riprogettato, prendendo in particolare considerazione il numero di elementi di distribuzione gas, la loro geometria, la loro lunghezza e la sequenza delle singole linee per l'introduzione dei gas. Sulla base di queste considerazioni è stato, quindi, realizzato un nuovo diffusore di reagenti gassosi con caratteristiche ottimizzate ai fini di ottenere un deposito uniforme sull'intera area del substrato. Le principali modifiche sono state le seguenti: i) è stato aumentato il numero dei canali di distribuzione gas (passando da 4 a 5) nella sequenza simmetrica H_2O/DEZ/H_2O/DEZ/H_2O; ii) la lunghezza lineare lungo l'asse x è stata aumentata del 20% rispetto alle dimensioni del substrato di vetro; iii) per limitare la reazione in fase omogenea, deleteria rispetto alla crescita del film sul substrato, si è deciso di limitare la temperatura del diffusore realizzando un sistema di raffreddamento sul diffusore stesso. A valle delle modifiche apportate, attraverso un attento controllo dei principali parametri di processo, si sono ottimizzate le condizioni di deposizione al fine di verificare la bontà delle modifiche apportate sulla riproducibilità degli strati in termini di spessore, conducibilità e trasmittanza. Sono state determinate le velocità di crescita in funzione della temperatura del substrato (Figura 146) sia sul materiale non drogato che drogato. Alla temperatura di 150°C la velocità di deposizione risulta intorno ai 25 Å/s e si ottengono i più bassi valori di resistività (1 x 10^{-3} Ω*cm nel caso di film drogati). L'uniformità di deposizione è stata verificata mediante misure di spessore e di resistenza di strato, utilizzando un profilometro ed un resistivimetro a quattro punte rispettivamente.

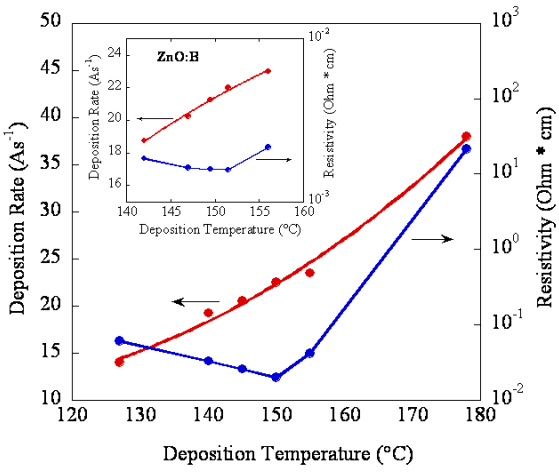


Figura 146. Dipendenza della velocità di deposizione e della resistività dalla temperatura di deposizione per ZnO non drogato. Nell'inserto è riportata la stessa dipendenza per film di ZnO drogati boro

I risultati ottenuti sono di seguito riportati:

- il film di ZnO è completamente testurizzato (ha aspetto lattescente) sull'intera area 30 x 30 cm^2 (Figura 147a),
- l'uniformità di spessore e di proprietà elettriche (Rsh) presenta un discostamento massimo dal valore medio entro il 5% su un'area di 27 x 30 cm^2 (Figura 147b);
- il processo è perfettamente ripetibile;
- le velocità di deposizione ottenute sono intorno a 25 Å/sec.

Le lievi disuniformità sia di spessore che di Rsh sulla zona di bordo del substrato sono imputabili al minor riscaldamento del bordo per effetto della maggiore dispersione termica, fenomeno che lungo i bordi della direzione x dà luogo ad una riduzione della velocità di crescita nei 15 mm di bordo della lastra di vetro. Inconveniente che, viceversa, la movimentazione del substrato lungo la direzione Y consente di superare. Possiamo quindi affermare che l'obiettivo previsto di uniformare le proprietà del TCO depositato su larga area possa ritenersi raggiunto in modo soddisfacente. Pertanto riteniamo che lo scale-up industriale di questo apparato prototipale MOCVD per la deposizione dello ZnO, caratterizzato da una distribuzione dinamica dei reagenti di "concept design" e brevetto ENEA, sia un obiettivo concretamente perseguibile.

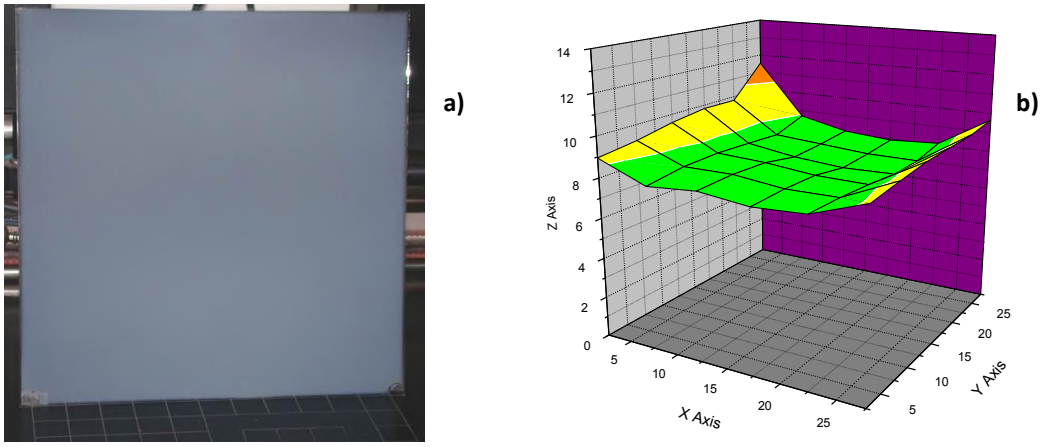


Figura 147. a) immagine dell'uniformità di testurizzazione e b) mappa della Sheet Resistance (Rsh) di un film di ZnO:B depositato su vetro su un'area di 30 x 30 cm^2

B.3 Sintesi via sol-gel di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO per applicazioni fotovoltaiche

L'utilizzo di una tecnica "no-vacuum", quale quella sol-gel, per la realizzazione di ZnO con caratteristiche ottiche, morfologiche ed elettriche tali da candidarlo come elettrodo frontale di una cella solare a film sottile rappresenta l'idea alla base di questa attività svolta in collaborazione con l'Università di Napoli [Report RdS/2012/210].

Per perseguire questo obiettivo si sono esplorate diverse strategie, tra loro sinergiche, quali la realizzazione di film multistrato, il drogaggio con elementi aliovalenti a partire dal boro e/o con l'idrogeno, l'utilizzo di valori elevati del pH (campo basico) del mezzo di reazione.

Il drogaggio dei film è stato eseguito perseguendo due strategie diverse: una ricorreva all'utilizzo di un elemento aliovalente, il boro, l'altra prevedeva il ricorso a trattamenti termici eseguiti in atmosfera parzialmente riducente, utilizzando una miscela gassosa di azoto ed idrogeno (FG). Il livello di drogaggio ottimale per ora raggiunto si ha per un film ZnO:B con concentrazione di boro pari a 0,8 % in atomi; mentre il trattamento termico ottimale in FG (H_2 5% in volume) è stato ottenuto alla temperatura di 450 °C per 0,5 h.

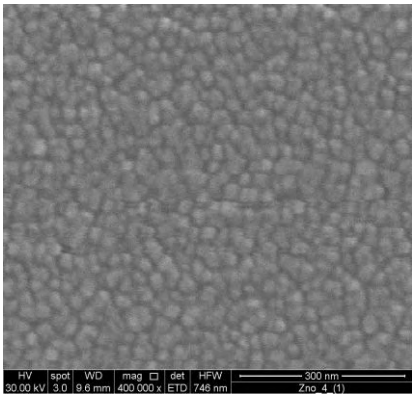


Figura 148. Immagine SEM del film a 8 strati di ZnO ottenuto dalla soluzione a pH = 8,0

A partire da una soluzione a pH = 7,6, si sono ottenuti spessori elevati che hanno raggiunto valori superiori a 400 nm per i film a 10 strati di ZnO e di ZnO:B (0,8 % in atomi). Le caratteristiche morfologiche di questi film multistrato risultano migliori rispetto a quelle dei film mono-strato, mostrando maggiore uniformità ed omogeneità e minore porosità. Il grado di cristallinità dei film multistrato risulta più elevato e le caratteristiche ottiche non subiscono particolari decadimenti se confrontate con quelle dei film mono-strato, riuscendo a conservare una trasmittanza di circa l'85%, come valore medio calcolato sull'intero intervallo spettrale del visibile.

I film ottenuti dalla soluzione a pH 8,0 presentano, a parità del numero di strati, valori di spessore estremamente più elevati. Ad esempio per i film a 8 strati di ZnO si osserva uno spessore di circa 775 nm a pH=8,0 mentre utilizzando la soluzione a pH=7,6 si ottiene uno spessore di circa 300 nm. Le caratteristiche morfologiche appaiono migliorate e la dimensione media dei grani cristallini risulta più elevata (Figura 148). Questi miglioramenti si riflettono sui valori di resistività, che a parità del numero di strati, risultano essere più bassi all'aumentare del pH della soluzione.

La sperimentazione sui film ottenuti con la soluzione a pH = 9,0 è solo all'inizio, anche se si è già ottenuto uno dei risultati più significativi dell'intera sperimentazione. Infatti questi film sono caratterizzati da valori di trasmittanza diffusa tali da consentire un efficace intrappolamento della radiazione luminosa all'interno della cella (Figura 149).

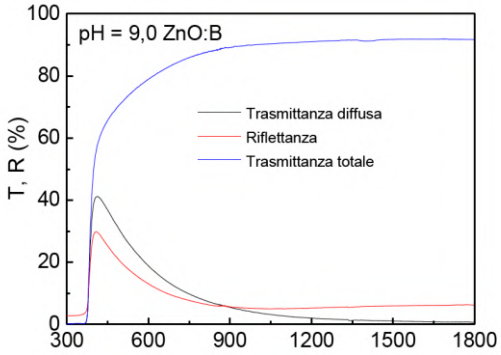


Figura 149. Curve di trasmittanza, totale (linea blu) e diffusa (linea nera), e di riflettanza (linea rossa) di un film a 10 strati di ZnO:B ottenuto dalla soluzione a pH = 9,0, nell'intervallo di lunghezze d'onda 300 – 1800 nm

Un film a 8 strati di ZnO:B (0,8 % in atomi) ottenuto da questa soluzione è stato utilizzato per eseguire test preliminari di fabbricazione di dispositivi di tipo p-i-n in silicio amorfo. In Figura 150 è mostrata l'efficienza quantica di una cella realizzata e per confronto è riportata anche la EQE di una cella analoga depositata su substrato di tipo commerciale. Le misure I-V e di risposta spettrale mostrano per il dispositivo cresciuto su elettrodo frontale ottenuto per sol-gel delle prestazioni piuttosto basse, se paragonate a quelle ottenute utilizzando substrati di tipo commerciale. Ciò è probabilmente effetto dell'elevata resistenza di strato del film utilizzato (1 kΩ/square). Tuttavia, i dispositivi realizzati sono tra i primi esempi di celle su un elettrodo frontale ottenuto via sol-gel. Ulteriore sperimentazione è, comunque, necessaria al fine di migliorare la qualità elettrica dei film di ZnO ottenuti per sol-gel.

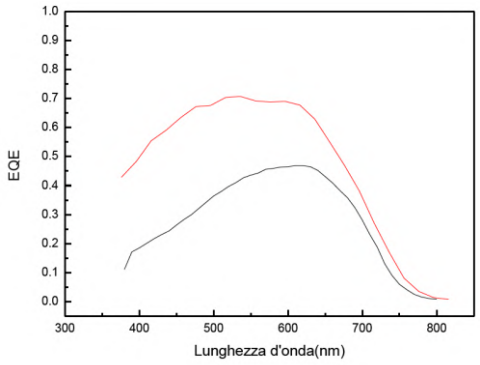


Figura 150. Efficienza quantica esterna del dispositivo realizzato su ZnO depositato per sol-gel (curva nera). Per confronto viene riportata la curva tipica di un dispositivo fabbricato su substrato commerciale (curva rossa)

B.4 Analisi numerica di cristalli fotonici per il confinamento ottico della radiazione in celle fotovoltaiche a film sottile

Una delle tecniche utilizzate per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare consiste nel realizzare un back-reflector, ossia uno specchio sulla parte posteriore della cella con la funzione di riflettere la luce, così da indurre un ulteriore passaggio della stessa nel semiconduttore, aumentando il cammino ottico. Diversi studi nel settore hanno dimostrato che un incremento delle prestazioni può essere ottenuto utilizzando strutture a cristallo fotonico o nanograting metallici nella parte posteriore delle celle. Il miglioramento dell'assorbimento è dovuto

all'eccitazione di modi guidati planari propaganti nella regione attiva di silicio, agli effetti di tipo Fabry-Perot e a fenomeni plasmonici che intrappolano la luce nella cella favorendone l'assorbimento.

Lo scopo dell'attività svolta in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio [Report RdS/2012/211] è quello di trovare strutture riflettenti alternative a quelle periodiche classiche per favorire l'intrappolamento della luce nella regione attiva di silicio a più ampio spettro ed aumentare dunque l'efficienza della cella solare. La scelta è motivata dalla ricchezza intrinseca dello spettro di diffrazione delle geometrie aperiodiche, che facilita il raggiungimento della condizione di phase-matching necessaria per l'eccitazione dei modi risonanti (sia plasmonici che fotonici). In particolare si è deciso di impiegare come riflettore posteriore cristalli fotonici monodimensionali in configurazione aperiodica basati sulla serie di Fibonacci. Per via dell'onere computazionale ci si è concentrati in questa prima fase su quasi cristalli monodimensionali, ma non è da escludere la possibilità di poter estendere tali analisi a strutture bidimensionali nel prossimo futuro, che risultano essere indipendenti dalla polarizzazione della luce incidente. La sequenza di Fibonacci può essere ottenuta partendo da un alfabeto di due simboli a e b ed utilizzando una regola di sostituzione iterativa: a->ab, b->a. Nel caso di interesse, le due costanti a e b sono associate alla distanza tra due ridges ('dentini' del reticolo) successivi; il rapporto tra le due costanti è scelto pari alla sezione aurea $\tau=b/a$. La struttura, così definita, può essere generalizzata variando il rapporto, infatti per $\tau = 1$ ricadiamo nel caso di reticolo periodico. La successione di Fibonacci, per sua natura è composta da infiniti termini, e non è, dunque, simulabile numericamente. La cella solare sarà costituita da una supercella di Fibonacci, troncata ad un certo ordine, replicata poi all'infinito tramite le condizioni di periodicità di Bloch-Floquet. Nel caso in esame la serie è stata troncata ad un ordine massimo pari a 7.

Come già evidenziato nella scorsa annualità, la mancanza di periodicità spaziale impedisce l'applicazione diretta dei consolidati strumenti e concetti teorici (come il teorema di Bloch). Tuttavia, le fenomenologie di base possono ancora essere comprese studiando una parte sufficientemente grande del reticolo aperiodico, artificialmente terminato con adeguate condizioni al contorno periodiche ("approssimazione della supercella").

La piattaforma simulativa per le strutture aperiodiche era stata già ampiamente testata nella scorsa annualità; in questa fase è stata dunque applicata per calcolare l'assorbimento dovuto alla presenza di backreflectors aperiodici, effettuando anche un confronto periodico-aperiodico per quanto riguarda l'aumento di assorbimento prodotto nei due casi. In particolare lo studio numerico è stato effettuato con l'ausilio di COMSOL Multiphysics 3.5a (modulo RF) assistito da Matlab 7.9.0 R2009b.

L'assorbimento nella regione attiva di silicio è stato calcolato come flusso del vettore di Poynting su tutto il dominio della regione attiva. Gli assorbimenti ottenuti sono stati moltiplicati per lo spettro solare per pesare nel modo giusto eventuali picchi di assorbimento della struttura (dovuti all'eccitazione dei modi risonanti ad una determinata lunghezza d'onda) con la caratteristica della radiazione solare. E' stata condotta un'esaustiva analisi parametrica per l'ottimizzazione del periodo medio equivalente e del filling factor (F.F.), definito come il rapporto tra la larghezza dei ridge ed il periodo medio. L'utilizzo della nuova geometria aperiodica ha permesso di incrementare del 17% circa l'assorbimento tipico di celle caratterizzate da un semplice specchio metallico piatto e mediamente del 2-3% l'assorbimento ottenibile con geometrie periodiche. Sebbene i valori massimi di enhancement ottenuti con geometrie aperiodiche e periodiche siano tra loro comparabili, lo studio ha evidenziato come le strutture di Fibonacci presentano diverse configurazioni (in termini di parametri geometrici) ottime che ci permettono di tollerare meglio errori nei processi di fabbricazione, senza incidere molto sulle prestazioni della struttura. Nel caso periodico, invece, in caso di errori nel processo di fabbricazione (con piccole variazioni rispetto ai parametri geometrici ottimali di progetto) è più facile allontanarsi dalle efficienze teoriche ottenute. Naturalmente per mantenere basse tolleranze, bisogna usare tecniche di litografia costose che incidono sul prezzo finale della cella.

Le strutture periodiche offrono migliori prestazioni per periodi intorno a 275 nm, mentre quelle aperiodiche per periodi intorno a 400 nm (per entrambe il F.F. ottimale è del 50%). Oltre al reticolo diffrattivo che funge da back-reflector, una ulteriore ottimizzazione è stata effettuata giocando sugli spessori di tutti gli strati dei materiali (contatti e zona attiva) costituenti la cella che hanno portato l'enhancement dal 15 al 17%.

Sulla base dei risultati delle simulazioni sono state effettuate alcune prove per verificare la fattibilità sperimentale delle strutture investigate con un sistema di nano litografia avanzato quale il Focused Ion Beam (FIB). Tale sistema è costituito da un fascio di ioni di gallio, opportunamente focalizzato su dimensioni dell'ordine delle decine di nanometri, in grado di realizzare strutture ben definite su substrati di varia natura. A tal proposito sono state effettuate delle prove preliminari per stimare la minima risoluzione che si può ottenere lavorando film sottili di n-SiOx. Lo scopo finale delle prove effettuate è quello di ottenere dei solchi regolari, ossia aventi dimensioni e profilo quanto più vicini a quelli che sono i parametri di progetto. Per stimare il profilo e la profondità dello scavo, le prove fatte al FIB sono state analizzate al Microscopio a Forza Atomica (AFM). I risultati sperimentali riguardanti

la fabbricazione dei primi prototipi sono incoraggianti. Le risoluzioni degli scavi su silicio ottenuti al FIB (ottimizzando principalmente dose e strategy milling) sono in linea con i parametri di progetto. Resta tuttavia da ottimizzare la tempistica del processo di milling di ogni singolo scavo in modo da poter scrivere celle di aree dell'ordine del mm^2.

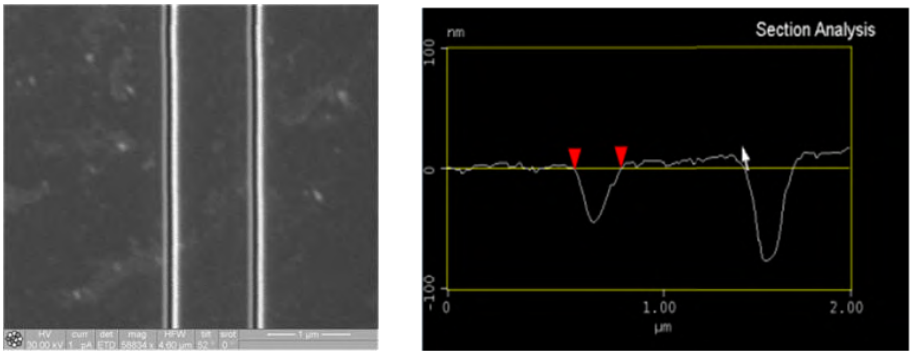


Figura 151. Immagine SEM e AFM di scavi effettuati al FIB

B.5 Substrati nanostrutturati per migliorare il confinamento ottico della radiazione nelle celle a film sottile

I temi sviluppati in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova [Report RdS/2012/212] hanno riguardato lo sviluppo di substrati nanostrutturati da utilizzare come supporti per dispositivi fotovoltaici a film sottile.

L'attività si è orientata principalmente allo sviluppo di processi di nanostrutturazione dei substrati di vetro e degli ossidi conduttori trasparenti (TCO) su di esso supportati allo scopo di indurre l'intrappolamento della radiazione solare nei dispositivi a film sottile di silicio (photon harvesting). Questo risultato è stato conseguito ricorrendo a trattamenti di nanostrutturazione all'interfaccia vetro-TCO volti a replicare gli effetti antiriflesso di sistemi bio-mimetici. La testurizzazione controllata dell'interfaccia di vetro è stata ottenuta tramite processi di erosione ionica auto-organizzata Ion Beam Sputtering - Ion Projection Lithography (IBS-IP).

Gli esperimenti hanno indicato che il processo IBS è in grado di realizzare in modo efficiente la nanostrutturazione ad alto rapporto di aspetto di substrati di vetro, utilizzando una maschera metallica come stencil per erodere selettivamente il substrato (IBS-IPL). Un elemento critico per ottenere la riduzione delle perdite per riflessione all'interfaccia è dato dall'incremento dell'altezza delle nanostrutture sino a valori confrontabili con una frazione significativa della lunghezza d'onda $h \sim \lambda/2$. In queste condizioni l'indice di rifrazione si adatta in modo graduale passando dal valore dell'aria a quello del substrato (index grading). Il processo di formazione delle nanostrutture realizzate tramite IBS-IPL è risultato in grado di aumentare la dinamica verticale delle nanostrutture di vetro sino a valori di rugosità RMS dell'ordine di 24 nm (corrispondenti ad una dinamica verticale media pari a circa 80 nm). Le misure ottiche effettuate su tali substrati (riflettività diretta e diffusa nell'intervallo VIS-NIR tramite sfera integratrice) hanno evidenziato che la riduzione delle perdite per riflessione dovuta agli effetti bio-mimetici risulta poco significativa; il contrasto dielettrico tra l'aria ed il substrato nanostrutturato è infatti ancora troppo marcato (la transizione tra aria e vetro è compressa entro una interfaccia di poche decine di nm). Il processo IBS è stato quindi modificato in modo da estendere la vita della maschera metallica auto-organizzata aumentando la dinamica verticale delle erosioni del substrato. La soluzione che è stata ideata e dimostrata con successo ha visto l'utilizzo di una sorgente metallica ausiliare, azionata in contemporanea al processo di erosione ionica. In questo modo, a partire dalla medesima maschera auto-organizzata descritta sopra, è stato possibile aumentare selettivamente l'ampiezza delle nanostrutture fino a valori di rugosità RMS pari a 83 nm, corrispondenti ad una dinamica verticale di 440 nm.

La caratterizzazione ottica è stata orientata a determinare la riduzione della riflettività totale (diretta + diffusa) dei substrati nanostrutturati rispetto a quelli lisci: la somma dei due contributi risulta ridotta in una percentuale che va dal 10 al 20% al crescere della lunghezza d'onda da 400 nm a 900 nm. Ancora più significativo risulta l'aumento della riflettività diffusa: i substrati presentano un haze (rapporto tra riflettività diffusa e totale) con andamento decrescente da 60 a 30% quando la lunghezze d'onda varia da 400 nm a 900 nm.

Le caratteristiche di light trapping dei substrati nanostrutturati sono state quindi verificate fabbricando su di essi dispositivi fotovoltaici a singola giunzione p-i-n in silicio amorfo. In Figura 152 è mostrato il confronto tra l'efficienza quantica ottenuta utilizzando il vetro nanostrutturato e quella ottenuta nel caso di substrato flat. Si nota un notevole incremento della EQE per il dispositivo cresciuto sul substrato nanostrutturato nella regione

rossa dello spettro; inoltre le frange, dovute a fenomeni di interferenza, sono meno evidenti rispetto al caso del substrato flat. Parallelamente la corrente di corto circuito J_{SC} passa da 12,3 mA/cm^2, valore misurato sul substrato flat a 14,2 mA/cm^2 nel caso del vetro nanostrutturato. L'aumento della risposta spettrale dei dispositivi è attribuito principalmente all'aumento della probabilità di assorbimento dei fotoni diffusi ad angoli elevati dall'interfaccia nanostrutturata (haze elevato), ed in secondo luogo alla riduzione delle perdite per riflessione dovute all'effetto bio-mimetico antiriflesso.

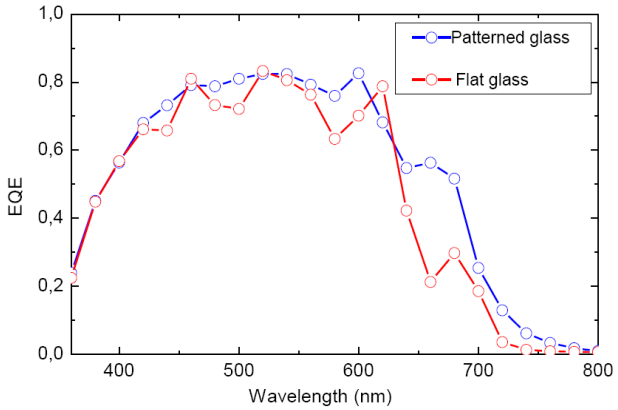


Figura 152. Confronto tra l'efficienza quantica di due celle identiche realizzate su substrato nanostrutturato (curva blu) e substrato flat (curva rossa)

In conclusione si può dire che gli obiettivi previsti dalla linea B sono stati raggiunti. Sono stati ottenuti film di ZnO:B "full haze" che sono, poi, stati testati come substrati per celle micromorfe, ottenendo risultati incoraggianti. Sono state apportate delle modifiche all'impianto MOCVD per migliorare l'uniformità di deposizione dello ZnO. E' continuato il lavoro sullo sviluppo di film di ZnO tramite tecnica sol-gel: alcuni substrati sono stati testati, fabbricando su di essi i primi prototipi di dispositivo. Si è inoltre lavorato alla progettazione di riflettori posteriori innovativi e alla nanostrutturazione di substrati di vetro.

C. Sviluppo di celle a film sottile di silicio cristallino

L'obiettivo di questa attività di ricerca consiste nella realizzazione di dispositivi fotovoltaici nei quali il materiale assorbitore è costituito da un sottile strato di silicio cristallino (cSiTF), con spessore dell'ordine di qualche decina di micron.

L'attività era stata inizialmente impostata su architetture di celle solari basate su film di c-Si cresciuti per epitassia. La fase iniziale di studio e sperimentazione prevedeva l'utilizzo di wafer commerciali di c-Si di tipo SOI (Silicon On Insulator), dove uno strato sottile di c-Si di drogaggio e spessore opportuni è attaccato ad un wafer sacrificale in c-Si di bassa qualità tramite un sottile strato in SiO_2 o di silicio poroso. L'idea consisteva nella messa a punto di alcuni step di processo, tipici delle celle in c-Si convenzionali, sullo strato sottile di c-Si su SOI per poi successivamente staccare tale strato e trasferirlo su substrato opportuno a basso costo, completando infine il dispositivo con opportuni processi. Uno studio più approfondito ha evidenziato alcune criticità di questa tecnologia, quale il processo di trasferimento di una cella semilavorata su altro substrato, per il quale la probabilità di insuccesso si può tradurre nella rottura del dispositivo stesso. La crescita epitassiale, inoltre, è un processo ad elevata temperatura e quindi non a basso costo. A valle di tale studio si è deciso di semplificare il processo servendosi sia di wafer sottili di silicio monocristallino commerciali di spessore 50-100 µm, che di wafer a basso costo quasi mono-cristallini, di spessore intorno a 150 µm, prodotti con la tecnologia utilizzata per il silicio multicristallino ma con un processo di lento raffreddamento finale. Tali wafer sono oggi commercialmente disponibili ed a costo contenuto. Bisogna, inoltre, considerare che attualmente vi è un notevole sforzo nella ricerca industriale al fine di contenere i costi di produzione di wafer sottili di ottima qualità, dell'ordine di 50-100 µm di spessore, ottenuti mediante esfoliazione da un lingotto di c-Si. Si è deciso di puntare su due architetture diverse, entrambe basate su materiale di tipo p: dispositivo con emitter ottenuto per diffusione termica del drogante e dispositivo ad eterogiunzione con emitter innovativo in ossido di silicio drogato ottenuto con tecnologia PECVD. Poiché entrambe le architetture sono basate su cSiTF è importante prevedere un'adeguata strategia di confinamento ottico della radiazione solare. E' stato, pertanto, condotto parallelamente uno studio sul confinamento ottico mediante la realizzazione di specchi dielettrici (Bragg) in silicio poroso, in quanto tale tecnologia può rappresentare un'alternativa economica a strutture similari ottenute mediante tecnologie come PECVD o sputtering.

C.1 Realizzazione di dispositivi in silicio cristallino

L'attività di ricerca ha portato alla realizzazione di un primo dispositivo ad eterogiunzione, basato su di un wafer quasi mono-cristallino di tipo p e spessore di 180 µm sul quale si è depositato con tecnologia PECVD un emitter innovativo in SiOx drogato n, ottenendo un'efficienza iniziale del 15,8%. Nella Figura 153 è rappresentata l'architettura del dispositivo ad eterogiunzione realizzato.

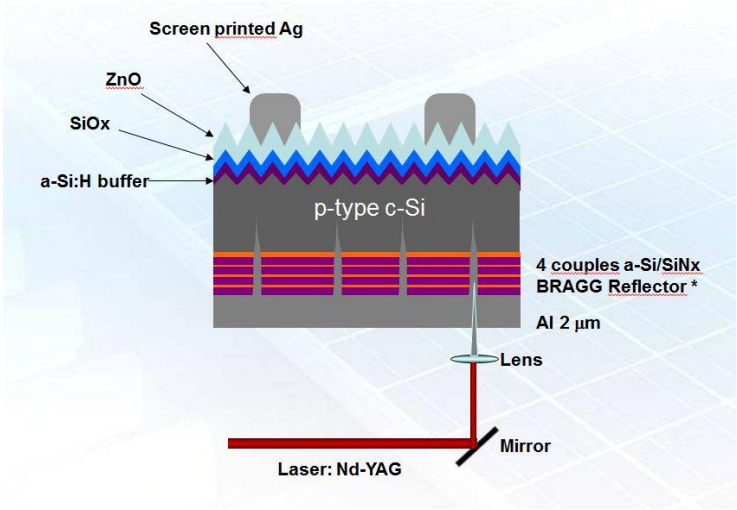


Figura 153. Architettura della cella a eterogiunzione

Il wafer di partenza è quasi monocristallino (CZ, <100>) di tipo p, con resistività 1 Ωcm e spessore intorno a 180 µm. L'idea è ottimizzare i vari step di processo su wafer quasi convenzionali per poi trasferirli su wafer sottili. La superficie frontale è stata testurizzata con attacco chimico basato su KOH in modo da aumentarne la rugosità e quindi lo scattering della radiazione solare incidente al fine di incrementarne il confinamento ottico all'interno del dispositivo. L'emitter n è stato realizzato in ossido di silicio drogato (n-SiOx), cresciuto mediante tecnologia PECVD convenzionale (13,56 MHz) a temperatura 150-200 °C. Da varie prove di deposizione di SiOx, in condizioni di diversa temperatura e pressione di processo, è risultato che il materiale presenta basse energie di attivazione (< 0,15 eV) anche per piccoli spessori, cioè intorno a 10 nm. I film di n-SiOx presentano, dunque, caratteristiche adeguate in termini elettrici per essere utilizzati come emitter nei dispositivi. Inoltre l'ossido di silicio ha l'ulteriore vantaggio di essere più trasparente alla radiazione che incide sul dispositivo rispetto ai film convenzionali di silicio drogato n. Da misure di lifetime risulta però che tale materiale non è un passivante ottimale delle superfici, ciò significa che sono presenti dei difetti all'interfaccia di giunzione p-n che rappresentano dei centri di ricombinazione per le cariche fotogenerate. E' stato quindi introdotto un buffer di qualche nanometro di silicio amorfo (a-Si:H), depositato mediante PECVD, che è noto essere un buon passivante: lo spessore utilizzato (5 nm) è abbastanza sottile da non inficiare la resistenza serie del dispositivo. Il contatto elettrico sul front end è rappresentato da un sottile strato di ossido conduttivo trasparente (TCO) e da una griglia metallica ottenuta per screen printing a base di argento. Lo strato di TCO è stato realizzato in ossido di zinco drogato alluminio (ZnO:Al), depositato tramite RF-sputtering, con spessore (70 nm) ottimizzato per svolgere la funzione di coating antiriflesso (DARC), in modo da migliorare l'accoppiamento ottico tra radiazione incidente e dispositivo. Sul retro del dispositivo è stato realizzato un multilayer in strati alternati di silicio amorfo e nitruro di silicio in configurazione Bragg, in modo da creare uno specchio dielettrico per il confinamento ottico della radiazione. La deposizione dei vari layer è stata fatta con tecnologia PECVD. Il contatto posteriore, infine, è costituito da un layer di alluminio (2 µm) depositato per evaporazione e-gun, il cui contatto con lo strato assorbitore p-cSi è assicurato mediante tecnologia laser firing tramite la quale è possibile creare dei canali conduttivi attraverso il multilayer dielettrico (Bragg). In Figura 154 è riportata la caratteristica I-V del dispositivo di area 3x3 cm^2 su cui è stata misurata un'efficienza pari a 15,8%.

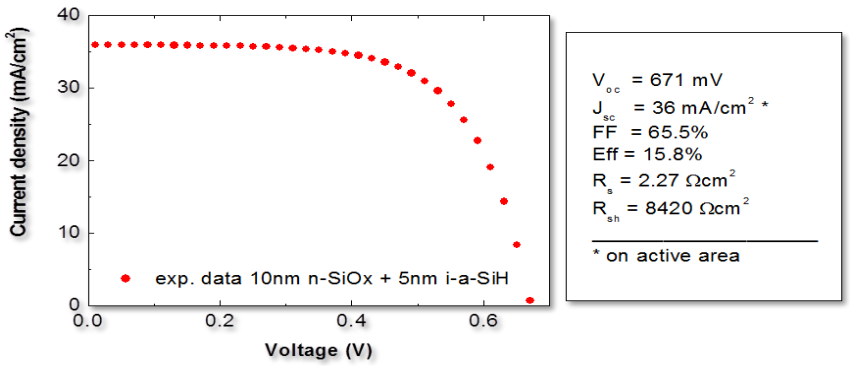


Figura 154. Caratteristica I-V della cella a eterogiunzione

Lo spessore dell'emitter in ossido di silicio drogato n è stato ottimizzato anche in funzione della risposta spettrale del dispositivo. Nella Figura 155 sono mostrate le risposte spettrali ottenute da dispositivi con differenti spessori di n-SiOx, a parità di spessore dello strato buffer in a-Si:H.

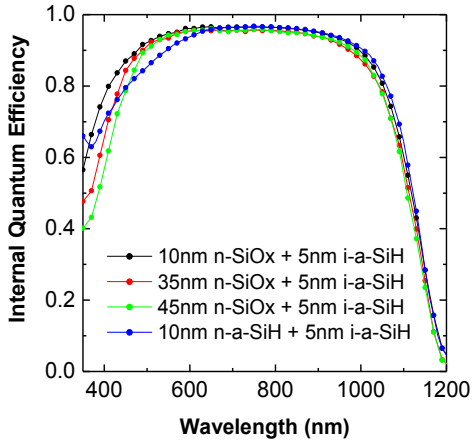


Figura 155. Efficienza quantica interna per vari spessori di n-SiOx

Dalla figura si nota come la risposta spettrale nella regione blu sia più elevata al decrescere dello spessore. Nella figura è riportata per confronto anche la risposta spettrale di un dispositivo realizzato con emitter standard in silicio amorfo drogato (n-a-Si:H) di pari spessore (10 nm), testimoniando in tal modo che il materiale innovativo n-SiOx migliori le prestazioni di un simile dispositivo. Per migliorare ulteriormente l'efficienza della cella solare si pensa di intervenire sull'ottimizzazione del texturing frontale (resistenza di shunt) e sul contatto in TCO frontale (resistenza di serie).

L'attività di ricerca sulle celle in cSiTF con emitter a diffusione termica è stata volta principalmente alla messa a punto dei processi di diffusione di drogante e di crescita di ossido di silicio, entrambi realizzati ad alta temperatura (> 850°C) con forno a tubo aperto. Si sono utilizzati inizialmente wafer p-type di spessore >250 µm in modo da poter trasferire in seguito i processi su wafer di spessori da 50 e 100 µm che sono stati acquistati recentemente. Sono attualmente in fase di completamento un set di celle la cui architettura è rappresentata in Figura 156.

Il processo di diffusione termica del drogante, nel nostro caso costituito da fosforo tramite precursore in $POCl_3$, prevede una prima fase a 850°C di diffusione superficiale ed una fase successiva (drive-in) a 900°C in presenza di ossigeno che consente la penetrazione del drogante all'interno, creando un profilo di densità di fosforo con una profondità desiderata intorno a 400 nm. Nella fase di drive-in si crea contemporaneamente una struttura di ossido di silicio drogato, sulla superficie del wafer, che successivamente viene rimossa chimicamente con un trattamento in HF. La messa a punto del processo consiste nella determinazione delle rampe di salita e discesa della temperatura di processo, nel flusso di gas di processo e nel tempo dedicato a ciascuno step. Sono state effettuate varie prove sia su wafer p-type di tipo CZ che su wafer di qualità superiore di tipo FZ basandosi inizialmente su una configurazione di parametri di processo messa a punto in precedenza per applicazioni nel fotovoltaico a concentrazione. Il monitoraggio del processo di diffusione avviene tramite misura di resistenza di sheet (Rs) dell'emitter e di lifetime dei portatori tramite Photo Conductance Decay (PCD). Un controllo più accurato del processo di diffusine è ottenuto effettuando una misura di profilo di drogaggio (Spread Resistance Profiling, SRP). Le misure di Rs sono risultate intorno a 30 Ωsq per wafer CZ, p-type con resistività 1 Ωcm: tale valore è minore di quello atteso (intorno a 60 Ωsq) e ciò potrebbe essere dovuto sia ad un drogaggio maggiore dell'emitter che ad uno spessore maggiore dello stesso. D'altronde, da misure di

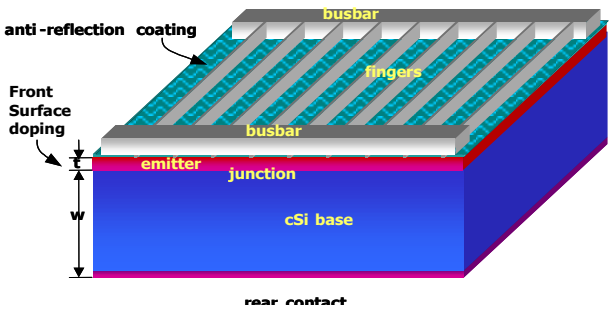


Figura 156. Architettura di cella con emitter a diffusione termica

spessore di ossido termico cresciuto sull'emitter risulta un tasso di crescita maggiore di quello atteso, il che è tipicamente dovuto ad un drogaggio maggiore dell'emitter. Le cause di tale evento sono ancora in fase di accertamento e potrebbero derivare da possibili contaminazioni del tubo della fornace.

Sono state inoltre effettuate varie prove di crescita di ossido termico sulla superficie del wafer. Lo strato di ossido termico è essenziale nell'architettura di una cella fotovoltaica in quanto svolge sia la funzione di passivante superficiale atta a contenere la densità di centri di ricombinazione di cariche, che una funzione protettiva per i successivi step fotolitografici per la definizione delle celle, la contattatura elettrica e la deposizione dello strato antiriflesso. Il processo in fornace per la creazione dell'ossido avviene a 850 °C in presenza di flusso di ossigeno con determinate rampe di salita e discesa di temperatura. Lo spessore ottimale di SiO_2 per una cella solare deve cadere in un ristretto intervallo 16-18 nm. A valle di varie prove effettuate su campioni di cSi p-type, si è ottenuto uno strato di ossido di 17,7 nm per 50 minuti di ossidazione. Il grado di passivazione superficiale dell'ossido è stato determinato tramite misure di vita media dei portatori minoritari (τ) con tecnica PCD. Si sono ottenuti valori ragionevoli (τ = 60 µs) per wafer di tipo FZ (p-type, 0,5 Ωcm), mentre per wafer di tipo CZ (p-type, 1 Ωcm) è risultato τ ~ 30 µs. Il valore più basso, indice di una peggiore funzionalità dell'ossido come passivante, è probabilmente dovuto a contaminazioni avvenute nella fase di pre-trattamento chimico delle superfici dei wafer.

Si è proceduto nella realizzazione di celle solari in cSi al fine di valutare eventuali ulteriori problematiche relative ai successivi step di processo ed attualmente è in fase di completamento un set di celle solari di area 1,1x1,1 cm^2 distribuite su 4 wafer con diverse configurazioni di griglia frontale di raccolta. Il completamento di una cella prevede diversi passi fotolitografici, sia per la definizione geometrica delle celle (mesa etching) che per la deposizione di contatti metallici sul front (griglia in Ti/Pd/Ag) e sul back (Al), nonché per la deposizione di un coating antiriflesso (DARC) in ZnS/MgF_2. A valle dei test che si stanno eseguendo, il processo realizzativo dei dispositivi sarà ottimizzato per essere poi trasferito sui substrati sottili (50-100 µm).

C.2 Sviluppo di film riflettenti a base di multistrato di silicio poroso

L'attività ha come obiettivo la realizzazione di specchi dielettrici in silicio poroso (PS) atti a migliorare il confinamento ottico della radiazione solare all'interno di un dispositivo fotovoltaico a film sottile di c-Si. Il silicio poroso è fabbricato a partire da un wafer di c-Si nel quale vengono create delle cavità di dimensione opportuna: a maggiore dimensione delle cavità corrisponde una maggiore porosità e di conseguenza un materiale ad indice di rifrazione effettivo più basso in quanto più prossimo a quello delle cavità, cioè a quello dell'aria. Il riflettore da realizzare è composto da una struttura a coppie di strati alternati di PS a bassa ed alta porosità (rispettivamente alto e basso indice di rifrazione), in configurazione Bragg. Per tale struttura al variare degli spessori e delle caratteristiche dei singoli strati ed al variare del numero di coppie si può modulare il profilo dello spettro di riflettanza in termini di lunghezza d'onda centrale e larghezza di banda.

La porosizzazione di un sottile strato superficiale di un wafer in cSi avviene tramite attacco elettrochimico (etching) in una soluzione 1:2 di acido fluoridrico (HF)/etanolo in condizione di buio e temperatura ambiente. Si è utilizzata una cella elettrochimica, schematizzata nella Figura 157, munita di un elettrodo in platino e di un galvanostato controllato tramite PC. All'aumentare della densità di corrente applicata si ottengono layer con maggiore porosità.

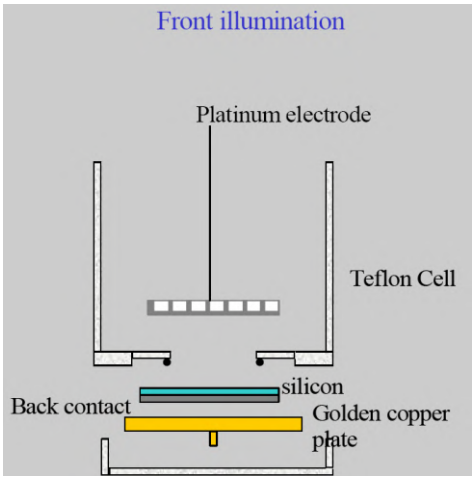


Figura 157. Schema della cella elettrochimica per realizzare film di silicio poroso

Al fine di progettare una struttura in PS in configurazione Bragg è necessario conoscere la legge di dispersione (n,k) del PS in funzione della porosità. A tale scopo sono stati fabbricati singoli strati di PS su wafer di cSi p-type con varie combinazioni di densità di corrente e tempi di etching. La stima della porosità e la legge di dispersione dei singoli strati sono state ottenute dal fit di misure di ellissometria, utilizzando opportuni modelli.

Sono stati quindi realizzati alcuni multilayer composti da 10 coppie di strati ad indice di rifrazione alternati basso/alto (n_L/n_H), ottenuti variando il tempo di etching e la densità di corrente (7-50 mA/cm^2). Nella Figura 158 sono mostrate le riflettanze sperimentali (R_S) di due multistrati di silicio poroso (denominati SA ed SC). Nella stessa figura sono mostrate le riflettanze valutate a partire dalla legge di dispersione ricavata dall'analisi ellissometrica ($R_{EL}(n,k)$). Tali misure testimoniano come sia possibile modulare il picco di riflettanza in funzione della lunghezza d'onda. La variazione del picco di riflettanza è visibile anche dalle immagini fotografiche di multistrati ottenuti con diverse condizioni sperimentali mostrate nella Figura 159.

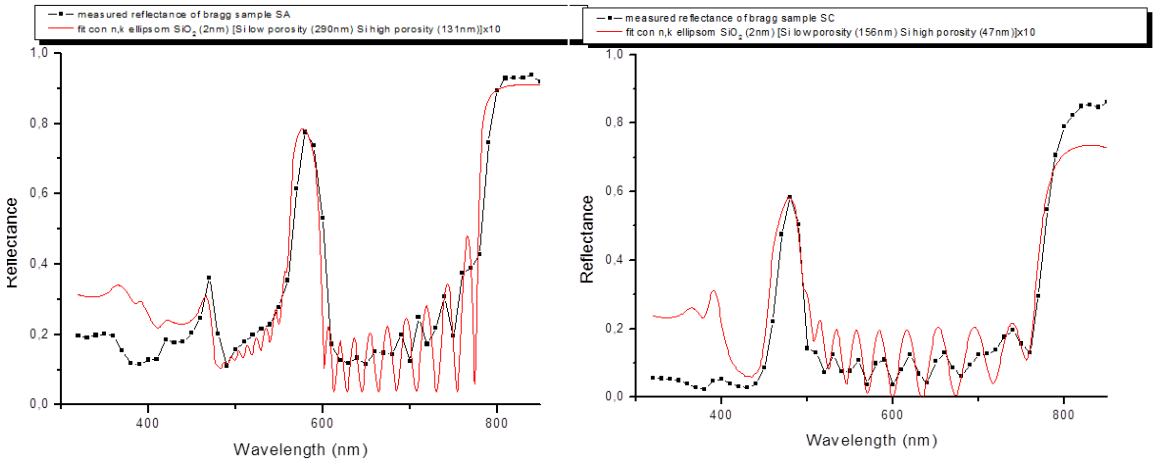


Figura 158. Riflettanze sperimentali (linea nera) e calcolate utilizzando le leggi di dispersione ricavate dall'analisi ellissometrica (linea rossa) ottenute su due multistrati di silicio poroso

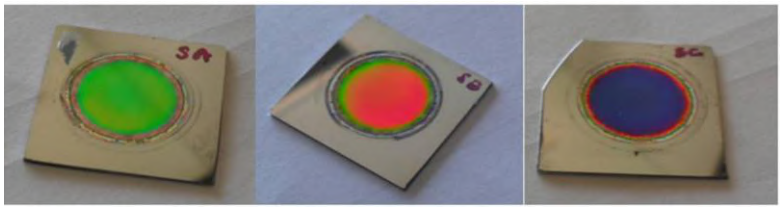


Figura 159. Campioni con diverse strutture di Bragg in PS

Le strutture a multistrato sono state caratterizzate morfologicamente tramite Focused Ion Beam (FIB). In Figura 160 è mostrata una tipica immagine dove il campione è stato bombardato da ioni di gallio per ottenere uno scavo trasversale (cross-section) che evidenzia l'alternanza dei vari strati porosi.

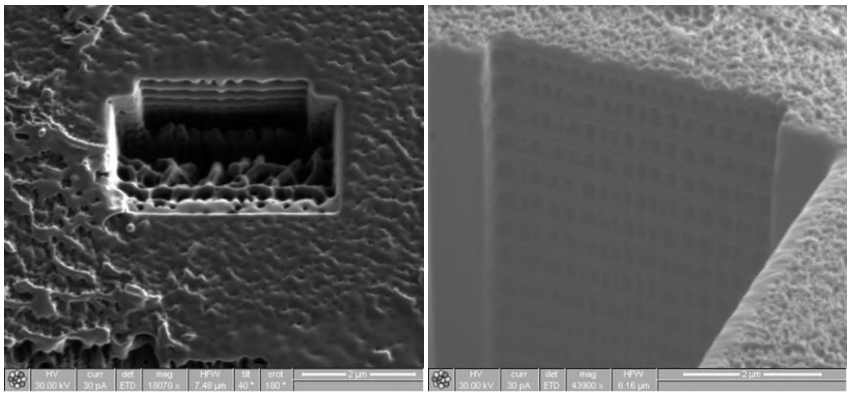


Figura 160. Immagini FIB di scavo trasversale su struttura Bragg in PS

E' importante considerare che le riflettanze mostrate come esempio nella Figura 158 sono ottenute studiando il comportamento ottico del multilayer di silicio poroso dalla faccia esposta all'aria: la radiazione dello spettrofotometro incide sulla struttura a multistrato provenendo dall'aria (riflettanza "esterna"). In realtà nella cella solare il riflettore di Bragg deve servire da specchio sulla parte posteriore della stessa cella, quindi va studiato l'effetto all'interfaccia cSi/multistrato non direttamente accessibile (riflettanza "interna"). La riflettanza misurata dal lato dell'aria fornisce però un utile strumento per monitorare il processo di realizzazione di un riflettore Bragg che deve essere progettato in maniera opportuna, stimando la riflettanza interna con dei simulatori ottici (quale ad esempio il software XOP, disponibile gratuitamente sul portale dell'ESRF - European Synchrotron Radiation Facility). Nella Figura 161 è, ad esempio, riportata la simulazione della riflettanza "interna" per un multistrato di silicio poroso composto da 20 coppie. Tale struttura mostra un valore elevato di riflettanza nel vicino infrarosso e

quindi è adatta al confinamento ottico della radiazione solare nella parte di spettro che presenta minor probabilità di assorbimento in una cella in cSi.

La sperimentazione è stata svolta utilizzando wafer di cSi di spessore "classico" (> 250 µm). Recentemente sono stati effettuati dei primi tentativi di realizzazione di PS a partire da wafer sottili (100 µm). La cella elettrochimica si è però rivelata inadatta in quanto gli stress meccanici indotti dal serraggio del campione creano la rottura dello stesso a valle del processo di etching. Risulta, pertanto, necessario munirsi di una cella elettrochimica con configurazione differente in modo da alloggiare i wafer sottili in maniera opportuna.

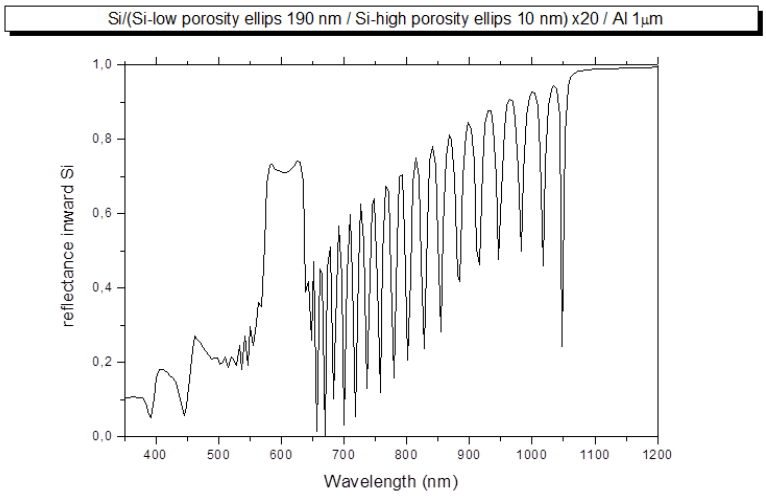


Figura 161. Simulazione ottica (software XOP) della riflettanza all'interfaccia silicio/riflettore di Bragg (multistrato di silicio poroso composto da 20 coppie)

Concludendo, sono stati realizzati dispositivi in silicio cristallino a eterogiunzione e in configurazione classica (questi ultimi sono in fase di completamento). Per le celle a eterogiunzione è stata ottenuta un'efficienza di 15,8% su un wafer a basso costo quasi monocristallino. E' stato inoltre condotto uno studio sul confinamento ottico della radiazione mediante la realizzazione di specchi dielettrici (Bragg) in silicio poroso. Non sono stati utilizzati substrati di tipo SOI e non è stata affrontata la tematica del trasferimento dei dispositivi su altri supporti in quanto si è deciso di puntare alla fabbricazione di celle in c-Si utilizzando direttamente substrati sottili (50-100 µm).

D. Sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI

L'obiettivo generale della linea di ricerca è lo sviluppo di materiali e celle a film sottili policristallini a base di rame ed elementi II-IV e VI. Per il momento l'attività è stata incentrata sul materiale più promettente e cioè il Cu_2ZnSnS_4 (CZTS).

Nel corso della precedente annualità è stato messo a punto un processo per la realizzazione di celle fotovoltaiche in cui il materiale attivo, il CZTS, viene realizzato depositando prima per evaporazione e-beam i precursori composti da un multilayer di ZnS, Sn e Cu e poi effettuando un annealing in presenza di zolfo in un forno di solforizzazione a tubo aperto. Lo strato sottile di CdS che costituisce la giunzione viene depositato per Chemical Bath Deposition e gli altri strati conduttivi per i contatti (molibdeno, ZnO intrinseco e ZnO drogato) vengono depositati per sputtering RF utilizzando un sistema con tre sorgenti magnetron in configurazione confocale. Con questo processo si era arrivati ad un'efficienza del 2%.

A valle di un'analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si era però deciso di effettuare un up-grade del sistema di sputtering in maniera da poter depositare i precursori per co-sputtering. Infatti, il processo attuale (che parte da precursori composti da più layer diversi sovrapposti) presenta problemi di segregazione di solfuri binari (ZnS, SnS_x, Cu_xS) e di disomogeneità di composizione del materiale lungo lo spessore del film. Tali problemi potrebbero essere risolti depositando contemporaneamente per sputtering i tre solfuri metallici (per esempio ZnS, CuS e SnS_2) del precursore visto che in questo caso si partirebbe da precursori in cui i metalli sono già distribuiti in maniera uniforme e parzialmente solforizzati fin dall'inizio. Per questo motivo è stato effettuato un up-grade del sistema di sputtering confocale per poter passare al co-sputtering da solfuri, consistente nell'installazione di due nuovi generatori e di un nuovo software di controllo. Contemporaneamente è stato anche acquisito un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti di Mo e ZnO.

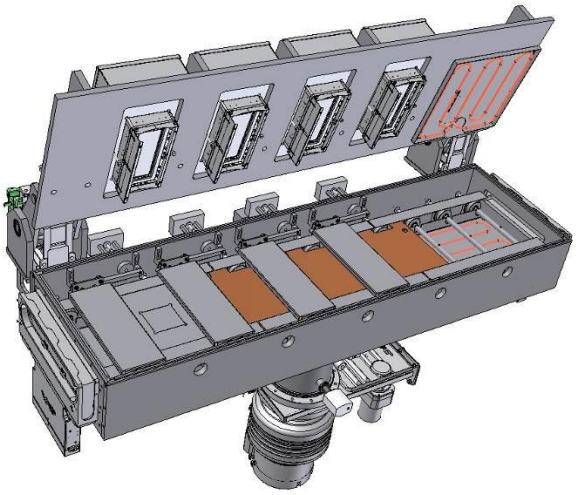


Figura 162. Schema del nuovo impianto di sputtering per la deposizione di film sottili di Mo e ZnO

Nel frattempo si è cercato di migliorare il processo disponibile e comprendere la fisica del CZTS chiarendo alcuni punti fondamentali. In particolare si è lavorato a:

1. installazione e prime prove di solforizzazione in un forno Rapid Thermal Processing (RTP);
2. sviluppo di un processo di deposizione del CZTS da soluzione;
3. studio delle proprietà del CZTS (gap, XRD, conducibilità, assorbimento ottico sotto gap, luminescenza) al variare della composizione dei precursori e delle condizioni di solforizzazione;
4. studio dei profili di composizione del materiale lungo lo spessore tramite X-ray Photoemission Spectroscopy (XPS) e Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GDOES);
5. studio dell'allineamento di banda CdS/CZTS tramite XPS;
6. studio dei processi di decomposizione ed evaporazione del materiale tramite calorimetria differenziale a scansione e analisi termogravimetrica (DSC/TGA).

1. Installazione e prime prove di solforizzazione in un forno RTP

Riguardo al processo di solforizzazione si è valutata la possibilità di sostituire il forno a tubo con un forno RTP. L'annealing del precursore in presenza di zolfo è un passaggio molto delicato nella realizzazione del CZTS, poiché il diagramma delle fasi di questo materiale quaternario è molto ricco e la regione di stabilità della kesterite è molto ristretta. Le variabili più importanti che sembrano influenzare la dinamica della reazione sono il volume all'interno del quale avviene la solforizzazione e il profilo di temperatura durante la reazione. L'utilizzo di un forno RTP permette non solo di ridurre i tempi necessari per l'intero ciclo termico (riscaldamento e raffreddamento) ma anche di ottimizzare il profilo di temperatura consentendone delle rapide variazioni.

Tuttavia provando ad utilizzare una rampa di salita con rate di 100 °C/min (cioè 10 volte più veloce di quella usata nel forno a tubo) si ottengono campioni di cattiva qualità e fortemente disomogenei. Il problema è stato risolto introducendo due plateau di temperatura a 250 e 400 °C lunghi 5 min ognuno. Con questo profilo di temperatura e utilizzando la stessa camera di reazione in vetro, i risultati ottenuti con l'RTP sono simili a quelli ottenuti col forno a tubo sia per quanto riguarda i campioni singoli che per le celle. L'unica differenza è che a parità di precursore utilizzato, i campioni ottenuti tramite forno RTP hanno un valore della gap lievemente più basso rispetto a quelli ottenuti nel forno a tubo (1,58 eV contro 1,62 eV).

Per migliorare l'omogeneità e il controllo della temperatura del campione si è provato a sostituire la camera di reazione in vetro (che essendo trasparente permette alla luce IR di scaldare direttamente il campione) con un'analoga scatola interamente realizzata in grafite. Tuttavia questa scatola ha dato risultati deludenti perché il leggero coperchio in grafite non assicurava una sufficiente tenuta durante la solforizzazione. A questo problema si è anche aggiunto quello della corrosione della termocoppia necessaria per il controllo della temperatura che, dovendo essere in diretto contatto con la scatola di reazione, viene rapidamente corrosa dai vapori di zolfo. Sono attualmente allo studio alcune soluzioni per superare questi due problemi.

2. Sviluppo di un processo di deposizione del CZTS da soluzione

È stato avviato lo sviluppo di un processo di deposizione del CZTS da soluzioni contenenti cloruri di rame ($Cu(II)Cl_2 \cdot 2H_2O$), zinco ($Zn(II)Cl_2$) e stagno ($Sn(IV)Cl_4$) come sorgenti per i metalli, la tiourea ($SC(NH_2)_2$) come

sorgente di zolfo e utilizzando l'etanolo come solvente. La soluzione è stechiometrica nei tre metalli, ma ha una concentrazione molare di tiourea doppia rispetto a quella stechiometrica. Un primo problema è che queste soluzioni mostrano una tendenza a formare precipitati che possono facilmente alterare le proporzioni tra i metalli. In particolare un'analisi dei precipitati tramite diffrazione a raggi X suggerisce una perdita preferenziale di rame e zolfo. La precipitazione sembra diventare più consistente all'aumentare del contenuto di acqua nella soluzione. Questo problema può essere limitato aggiungendo alcuni additivi alla soluzione.

Il film viene depositato su substrati di vetro soda-lime o su molibdeno per *dip-coating* e successivamente trattato termicamente a circa 220°C in argon per l'evaporazione del solvente e la ricristallizzazione del film. Questo processo è ripetuto più volte fino ad ottenere un film di CZTS (nanocristallino) dello spessore desiderato, che viene infine ulteriormente sottoposto a un annealing a temperature più elevate (circa 550°C) per migliorarne la cristallinità.

I campioni sono stati caratterizzati con le tecniche usuali (XRD, Spettrofotometria, EDX). Dopo il trattamento ad alte temperature, lo spettro XRD mostra una buona qualità del CZTS senza fasi spurie evidenti. Anche l'assorbimento ottico è regolare con un valore di gap intorno ad 1,48 eV. La composizione misurata con l'EDX mostra che i film preparati da soluzione a base di etanolo (senza additivi) risultano leggermente poveri in rame e ricchi in zinco: Cu/(Sn+Zn)=0,7-0,8. Questo è una conseguenza della formazione dei precipitati a base di rame e zolfo. L'aggiunta degli additivi alla soluzione, riducendo i fenomeni di precipitazione, dà luogo a film quasi stechiometrici.

Infine, si è anche tentato di produrre alcune celle con questi film: gli esperimenti sono ancora limitati, ma già in questa fase iniziale si è raggiunta un'efficienza dello 0,5%.

3. Studio delle proprietà del CZTS al variare della composizione dei precursori e delle condizioni di solforizzazione

Lo studio dell'influenza della stechiometria sulle proprietà optoelettroniche dei film e sull'efficienza dei dispositivi finali è ovviamente di primaria importanza. Per esempio è noto che in letteratura sono riportati valori di gap di energia nell'intervallo 1,45 - 1,65 eV, ma l'origine di tale variazione non è nota e non è chiaro se essa sia connessa a variazioni specifiche della stechiometria. È stato quindi iniziato uno studio sistematico degli effetti della variazione della concentrazione dei tre metalli (Zn, Sn, Cu). La loro concentrazione è, infatti, più facilmente controllabile rispetto allo zolfo perché è sufficiente cambiare i tempi di deposizione durante l'evaporazione del precursore.

Un primo insieme di campioni è stato preparato cambiando il rapporto atomico nominale tra rame e zinco da [Cu] : [Zn] = 2 : 1 a [Cu] : [Zn] = 2 : 1,48, mantenendo invece fissato il rapporto tra rame e stagno a [Cu] : [Sn] = 2 : 1,18. I campioni cresciuti a partire da questi precursori sono molto simili, avendo mostrato tutti una gap alta (1,6 eV) e un'alta resistività (circa 10^5 Ω cm). Questo risultato è probabilmente dovuto al fatto che lo ZnS in eccesso segrega sul retro del film, lasciando praticamente inalterata la composizione del CZTS. Misure spettrofotometriche preliminari hanno suggerito la possibilità di un lieve aumento del disordine cationico all'aumentare del contenuto di Zn, ma questo effetto va confermato da misure più accurate.

Più interessante è risultata essere l'influenza della variazione del rapporto rame/stagno. Un secondo insieme di campioni è stato preparato mantenendo fisso il rapporto rame/zinco a [Cu] : [Zn] = 2 : 1:48, mentre il rapporto rame/stagno è stato variato da [Cu] : [Sn] = 2 : 1:06 a [Cu] : [Sn] = 2 : 1:31. Si è scoperto che la gap del materiale aumenta sensibilmente (da 1,45 a 1,62 eV) all'aumentare del rapporto Sn/Cu. Attualmente sono in corso delle verifiche per capire se effetti simili siano ottenibili tenendo costante il rapporto Sn/Zn anziché il rapporto Cu/Zn. Queste variazioni di gap sono correlate con un cambiamento di ben due ordini di grandezza della concentrazione dei difetti nel film. Il contenuto di difetti è stato stimato con misure di assorbimento sotto gap effettuate utilizzando la spettroscopia a fdeflessione Fotonica e confermate da misure di fotoluminescenza. La variazione della concentrazione dei difetti si riflette anche sulla resistività del materiale, che aumenta da circa 100 Ω cm a circa 10^5 Ω cm al diminuire della densità dei difetti e sui parametri fotovoltaici dei dispositivi. In particolare l'utilizzo dei materiali a gap maggiore dà luogo a celle con V_{oc} più alte (fino a 700 mV), ma l'elevata resistività del materiale purtroppo riduce il FF e anche la J_{sc}. Tuttavia è proprio con uno di questi materiali che è stato raggiunto il nuovo record di efficienza del 2,5%. In Figura 163 sono mostrate le curve di efficienza quantica e la caratteristica I-V della cella record.

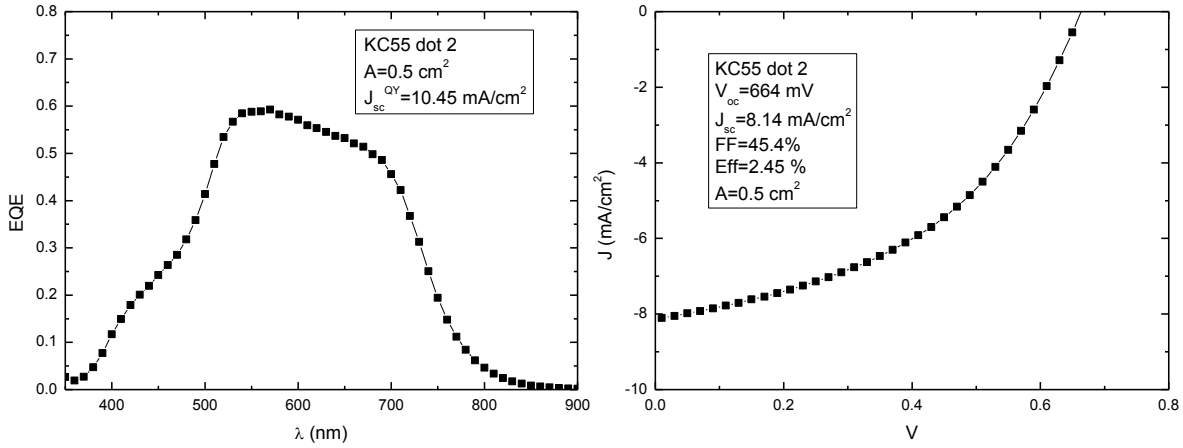


Figura 163. Risposta spettrale e caratteristica I-V della migliore cella a base di CZTS

Ben più complesso è ottenere una variazione controllata della concentrazione di zolfo nei film di CZTS. Un primo approccio empirico è stato quello di variare la quantità di zolfo inserita nella camera di solforizzazione. Purtroppo, visto che la camera non è perfettamente stagna, è difficile ricavare come varia la pressione parziale di zolfo durante il processo in funzione di questa quantità. Tuttavia si è notato che una riduzione della quantità di zolfo porta a materiali con una gap minore. Sono in corso verifiche per capire se questo effetto è direttamente dovuto al contenuto di zolfo nel film oppure a una maggiore volatilità dello stagno a pressione di zolfo ridotte.

4. Studio dei profili di composizione del materiale lungo lo spessore tramite GD-OES e XPS

La tecnica di crescita adottata è intrinsecamente soggetta a disomogeneità lungo lo spessore. Il motivo va ricercato sia nella natura a strati del precursore, ma anche nelle differenti mobilità degli atomi durante la solforizzazione. Infatti, affinché il precursore si trasformi in CZTS, gli atomi dei metalli devono migrare verso la superficie per poter reagire con gli atomi di zolfo. Eventuali disomogeneità lungo lo spessore potrebbero influenzare negativamente molti dei parametri di una cella solare.

Per controllare l'omogeneità di composizione dei film di CZTS sono state effettuate delle misure di XPS e GDOES. Da queste misure appare evidente una tendenza alla segregazione dello Zn sul retro del materiale che probabilmente deriva dai differenti coefficienti di diffusione di Cu, Sn e Zn (Figura 164). È da notare che, mentre l'XPS fornisce dei valori assoluti, la GD-OES invece permette solo di misurare intensità relative. Nella Figura 165 profili di concentrazione dei vari elementi valutati con tecnica GOOES sono stati riscalati in modo da riprodurre quelli assoluti misurati con l'XPS.

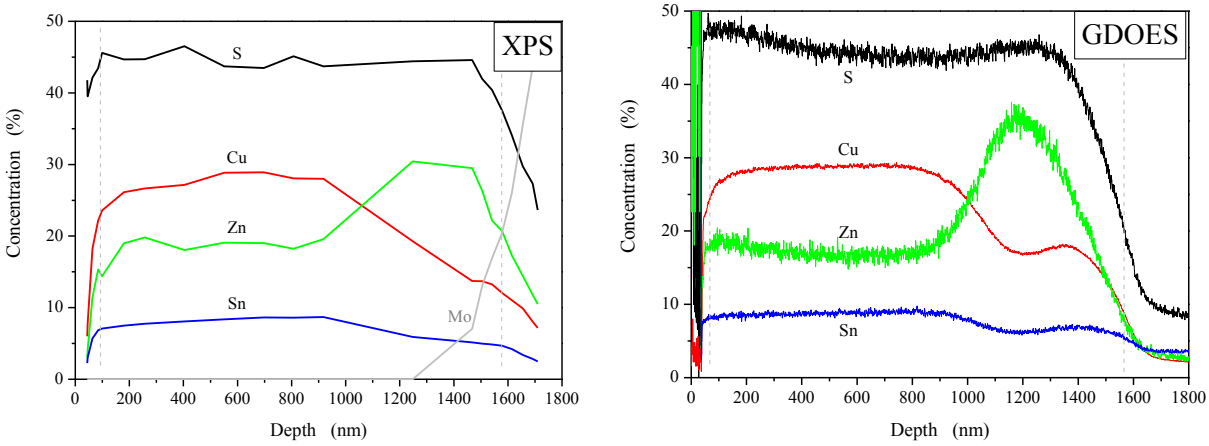


Figura 164. Profili di concentrazione di due campioni nominalmente simili di CZTS valutati con tecnica XPS e GDOES

5. Studio dell'allineamento di banda CdS/CZTS tramite XPS

È noto dalla letteratura che, uno dei principali fattori limitanti delle celle in CZTS è il basso valore della V_{oc}. Una delle cause più probabili è la scarsa qualità della giunzione CdS/CZTS sia per quanto riguarda l'allineamento delle bande che per quanto riguarda la densità di stati d'interfaccia. Si ritiene preferibile che la banda di conduzione del

CdS non sia posizionata più in basso di quella del CZTS (allineamento "cliff-type"). Questo, infatti, equivarrebbe ad una specie di riduzione della gap dell'interfaccia, con conseguente aumento dei processi di ricombinazione. Sarebbe invece preferibile un allineamento "spike-type" con il minimo della banda di conduzione del CdS più in alto di quella del CZTS. La tecnica più adatta per studiare il tipo di allineamento presente nei nostri dispositivi e la sua eventuale dipendenza da variazioni nel processo di fabbricazione della cella è la XPS. Finora in letteratura sono presenti due soli lavori che riportano misure di questo tipo, ma i loro risultati sono in disaccordo. Per effettuare questo tipo di analisi sono state fabbricate delle strutture CdS/CZTS/Mo. La discontinuità tra le bande di valenza dei due semiconduttori (VBO) è stata misurata usando due procedure indipendenti. Una procedura si basa esclusivamente sul confronto degli spettri XPS della banda di valenza corrispondenti al CdS puro e a una situazione in cui si vedono le bande di valenza di entrambi i semiconduttori. Dopo aver riallineato le energie di legame per tenere conto del band bending si ottiene da quest'analisi un VBO di (1,06 ± 0,04) eV. L'altra procedura, un po' meno precisa, sfrutta anche gli spostamenti dei livelli di core e dà un VBO di (1,21 ± 0,18) eV. Usando le gap dei due materiali, da questi valori di VBO si ricava che la discontinuità tra le bande di conduzione è "cliff type" con un valore assoluto compreso tra 0,16 e 0,31 eV. Questo tipo di allineamento di bande potrebbe essere alla base della bassa V_{oc} delle celle e quindi si dovrà cercare di modificarne i valori cambiando i processi di crescita dei materiali e/o di preparazione dell'interfaccia.

6. Studio dei processi di decomposizione ed evaporazione del materiale tramite DSC/TGA

La conoscenza delle reazioni chimico-fisiche che avvengono durante il processo di solforizzazione è fondamentale per poter regolare i parametri di crescita al fine di ottenere il materiale con le caratteristiche desiderate e quindi ottimizzare le prestazioni delle celle solari. In letteratura si possono trovare diversi lavori che analizzano questi meccanismi, in particolare tramite misure di diffrazione di raggi X in situ durante la crescita per solforizzazione a partire da un precursore depositato per co-sputtering. Uno degli aspetti che sono emersi da questi studi è che il CZTS si decompone in solfuri binari ad alte temperature. Questa decomposizione porterebbe principalmente alla perdita di stagno tramite l'evaporazione di SnS. L'eventuale decomposizione del CZTS alle temperature di crescita (fino a 600 °C) è di fondamentale importanza perché potrebbe influenzare le proprietà della superficie del CZTS e di conseguenza la qualità delle celle solari. La collaborazione con FN S.p.A. ha permesso di effettuare misure di TGA/DSC su campioni di CZTS. Queste misure sono in grado di quantificare la perdita di massa e le proprietà termiche del materiale in funzione della temperatura. In letteratura erano già state eseguite misure di TGA/DSC, ma con una semplice rampa di temperatura. Le nostre misure, invece, sono state effettuate mantenendo la temperatura costante a 550 °C per 8 ore. Le misure sono ancora in corso, ma risultati preliminari mostrano che la perdita di massa a 550 °C in flusso di azoto è di circa lo 0,5% l'ora. Le differenti pendenze osservate nella curva DSC suggeriscono l'evaporazione di diversi composti in differenti momenti del processo termico. Il controllo di queste perdite è ovviamente di fondamentale importanza per un controllo accurato della stechiometria. A tal fine, si possono trovare delle condizioni di processo che riducono drasticamente la perdita di massa. Per esempio abbiamo verificato che l'evaporazione di SnS può essere fortemente ridotta lavorando a pressione atmosferica in una camera chiusa, che confini i vapori di SnS.

In conclusione si può affermare che l'efficienza finale dei dispositivi non ha subito un incremento particolarmente rilevante, visto che l'efficienza massima ottenuta e stata del 2,5%. Tuttavia gli studi e il lavoro effettuati hanno consentito di individuare i cambiamenti di processo necessari a produrre dispositivi con prestazioni in linea con gli altri gruppi di ricerca in ambito internazionale.

Tutte le attività descritte sinteticamente in questa paragrafo sono state svolte in collaborazione con l'Università di Roma "La Sapienza", l'Università di Trento e FN S.p.A. e sono discusse in maniera approfondita nel Report RdS/2012/213.

E. Sviluppo di celle organiche a base di materiali polimerici

Nel corso delle annualità precedenti è stato predisposto un laboratorio per la realizzazione di celle fotovoltaiche polimeriche su piccola scala. Il cuore del laboratorio è costituito da un sistema glove-box con evaporatore termico integrato che consente di condurre tutti gli step di processo in atmosfera controllata e quindi permette di realizzare dispositivi evitando il degrado dei materiali. Inoltre sono state anche acquisite alcune apparecchiature di corredo (forno per annealing, sistema per la produzione di acqua deionizzata) che consentono di condurre le operazioni al contorno nelle migliori condizioni possibili. L'attività ha avuto l'obiettivo di migliorare le efficienze di conversione dei dispositivi raggiunte utilizzando come polimero semiconduttore il poli-3-esiltiofene (largamente usato in letteratura) in modo da renderli appetibili da un punto di vista industriale. Per ottenere questo risultato è stato necessario utilizzare altri materiali polimerici attivi che avessero una struttura elettronica più favorevole, sia per l'assorbimento della radiazione solare (per incrementare la corrente di uscita delle celle), sia per migliorare la

tensione di circuito aperto. Pertanto sono state sviluppate celle fotovoltaiche polimeriche aventi come materiale attivo una blend di un copolimero benzoditiofene-tienotiofene e un derivato del fullerene C70. Sono state affrontate le varie problematiche connesse con la deposizione dei materiali polimerici, il controllo della loro morfologia, la realizzazione dei contatti e la caratterizzazione dei dispositivi. I migliori dispositivi (non incapsulati) hanno raggiunto un'efficienza di conversione del 4,5% ma si prospettano margini di miglioramento caratterizzando gli stessi in un ambiente controllato.

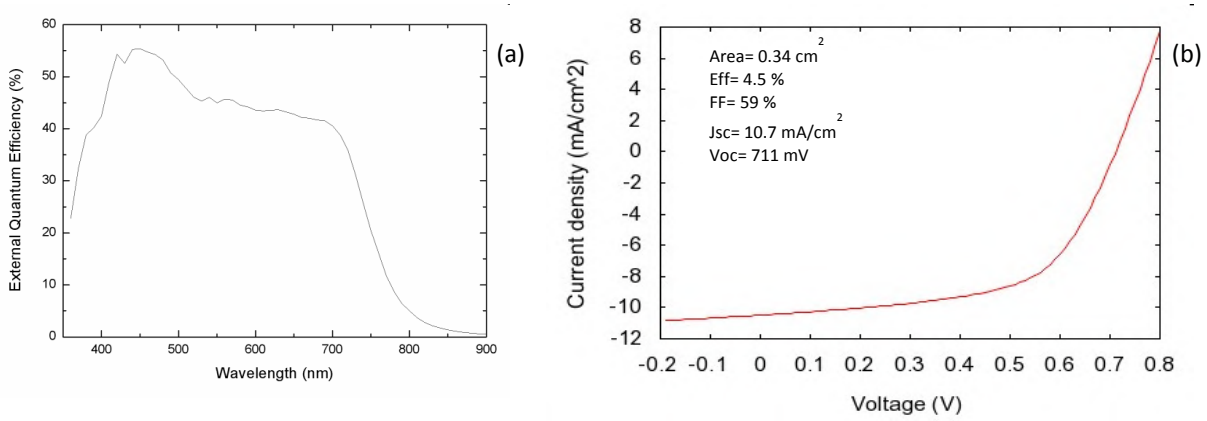


Figura 165. Misura dell'efficienza quantica esterna (a) e della caratteristica I-V (b) della migliore cella polimerica realizzata

E' stata avviata un'attività di ricerca per investigare l'utilizzo della tecnica di stampa inkjet per la realizzazione dello strato attivo di una cella fotovoltaica polimerica. La tecnica inkjet permette di eseguire deposizioni selettive di materiale definendo, mediante un opportuno file CAD, la geometria da realizzare. L'utilizzo di questa tecnologia innovativa per la realizzazione di celle solari organiche costituisce una valida alternativa ai metodi di tipo tradizionale soprattutto grazie ai bassi costi di processo e alla possibilità di realizzare deposizioni su larga scala. Il prototipo è stato ottenuto partendo da un blend di P3HT:PCBM disciolto in una miscela di clorobenzene e diclorobenzene. Il materiale è stato deposto con una pipetta "drop on the demand" di tipo piezoelettrico (Figura 166).

Lo strato attivo è stato ottimizzato variando il rapporto dei solventi in miscela, la temperatura del substrato, la frequenza di emissione delle gocce, il grado di sovrapposizione e la velocità della testa di stampa. Sul miglior dispositivo, basato sulla struttura VETRO / ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / Ca / Al, è stata misurata un'efficienza del 2,4%.

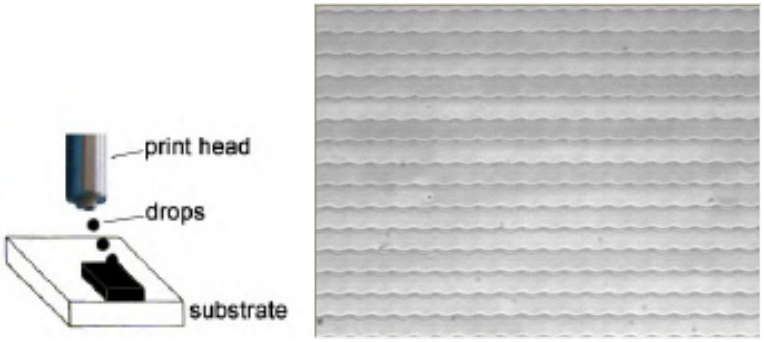
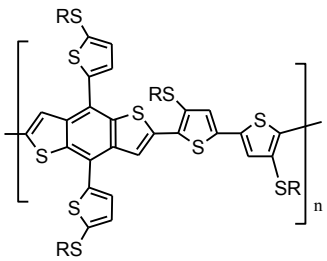
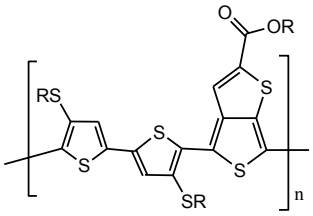


Figura 166. Micrografia ottica del P3HT:PCBM ottenuto con tecnica di stampa inkjet

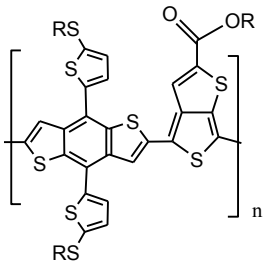
Il Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia si è occupata della sintesi di nuovi polimeri semiconduttori a bassa gap con caratteristiche strutturali potenzialmente idonee a migliorare le prestazioni fotovoltaiche delle celle solari organiche del tipo polimero-fullerene [Report RdS/2012/215). Sono state messe a punto le procedure sintetiche per la realizzazione dei seguenti copolimeri.



Poly A

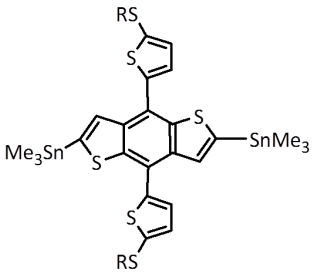


PolyB

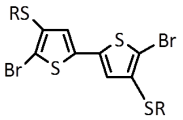


PolyC

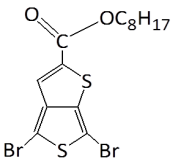
Per ottenere questi copolimeri è stato utilizzato l'accoppiamento di Stille tra un comonomero stannilato e un comonomero bromurato in presenza di un catalizzatore al palladio. I comonomeri utilizzati sono stati i seguenti:



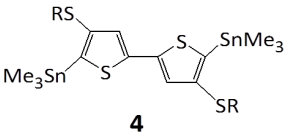
1



2



3



4

Tra tutte queste molecole, quelle che hanno rappresentato la sfida sintetica maggiore sono state quelle contenenti le unità tienotiofenica, che hanno dato problemi relativamente alla resa di alcuni passaggi e di stabilità. I prodotti ottenuti sono stati caratterizzati tramite ^{1}H e ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance (NMR) mono e bidimensionale e nel caso dei polimeri, spettroscopia IR, spettroscopia UV-Vis e Gel Permeation Chromatography (GPC). Attualmente nei laboratori dell'ENEA di Portici si stanno testando tali polimeri come materiali donori di elettroni per celle solari organiche.

Inoltre sono stati testati i polimeri semiconduttori sintetizzati e forniti durante la precedente annualità dall'Università di Modena e Reggio Emilia, come materiali donori in celle fotovoltaiche polimeriche. I migliori risultati sono stati ottenuti con un copolimero delle unità bitiofene e benzoditiofene, che ha portato ad efficienze di conversione nei relativi dispositivi del 2,3%.

In collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", è stato sviluppato un sistema ibrido innovativo in cui un copolimero a blocchi nanostrutturato è selettivamente caricato con nanoparticelle inorganiche conduttive [Report RdS/2012/214]. I copolimeri a blocchi hanno suscitato grande interesse nel campo delle nanotecnologie data la loro capacità di auto-organizzarsi in strutture aventi periodicità su scala nanometrica. Essi sono materiali polimerici in cui macromolecole di due o più omopolimeri differenti sono chimicamente legati tra loro per formare macromolecole complesse con architettura lineare o non lineare. Se i diversi blocchi polimerici sono chimicamente incompatibili si ha separazione di fase con segregazione spontanea delle differenti macromolecole in diversi microdomini che mostrano una disposizione regolare da cui deriva la formazione di strutture periodiche. Le nanostrutture ordinate formate per self-assembly, possono essere utilizzate come matrici (host) per l'inclusione selettiva di molecole ospiti (guest) in specifici domini ottenendo così una dispersione ordinata e periodica delle nanoparticelle. In questo modo è possibile realizzare nanocompositi con proprietà fisiche speciali.

L'attività di ricerca svolta si è incentrata, quindi, sullo studio strutturale e morfologico di copolimeri a blocchi amorfi verificando, al contempo, la possibilità di ottenere con questi materiali nanostrutture ordinate. La realizzazione del materiale nanocomposito è stata effettuata utilizzando un copolimero di-blocco poli(stirene-b-metilmetacrilato) (PS-b-PMMA). Il materiale è caratterizzato da masse molecolari dei blocchi e frazioni in volume tali da garantire la formazione di nanostrutture con geometria di tipo lamellare. Film sottili dello spessore di 70 nm sono stati ottenuti mediante tecniche quali spin coating e drop casting a partire da soluzioni piuttosto diluite (2% e 0,5% in peso rispettivamente) di copolimero in toluene utilizzando come substrato un ossido trasparente e conduttivo quale l'ossido di indio drogato con stagno (ITO). In particolare, il substrato di ITO utilizzato ha permesso

di controllare l'orientazione dei microdomini lamellari di PS-b-PMMA che risultano orientati perpendicolarmente rispetto al substrato, con spessore medio dei domini di PS e PMMA di 13 nm e 19 nm rispettivamente. Tale orientazione è ottenuta grazie all'impiego del substrato di ITO, che mostra una superficie neutra con assenza di interazioni preferenziali con i domini di PS e PMMA. Tuttavia, in assenza di campi esterni, le lamelle sono allineate verticalmente ma orientate secondo direzioni casuali, quindi caratterizzate da un ordine a corto raggio nel parallelismo tra le superfici lamellari stesse. È stata successivamente studiata la possibilità di utilizzare le strutture lamellari ottenute per realizzare un nanocomposito ibrido in cui nanoparticelle metalliche risultano selettivamente sequestrate in uno specifico dominio. È stato quindi realizzato un nanocomposito ibrido incorporando nanoparticelle di oro (AuNP) all'interno delle strutture lamellari del PS-b-PMMA utilizzando un metodo semplice ed innovativo basato su una deposizione selettiva di AuNP termicamente evaporate e successivamente condensate sulla superficie del film in alto vuoto. L'analisi TEM eseguita su questi campioni ha messo in evidenza la presenza di particelle di oro sull'intera superficie del film. L'inclusione selettiva di queste nanoparticelle in uno dei domini lamellari, in particolare nel PS, è stata ottenuta dopo trattamento di annealing in vuoto a temperature superiori alla temperatura di transizione vetrosa del copolimero ma inferiore rispetto a quella in cui si può avere degradazione del materiale. In queste condizioni, dopo ricottura, le nanoparticelle metalliche sono incluse selettivamente nei domini di PS, portando così alla formazione di uno speciale nanocomposito caratterizzato da una matrice polimerica nanostrutturata in cui vi è un'ottima dispersione di nanoparticelle di oro selettivamente incluse nei domini lamellari di PS (le regioni scure in Figura 167b in cui sono presenti gli spot neri).

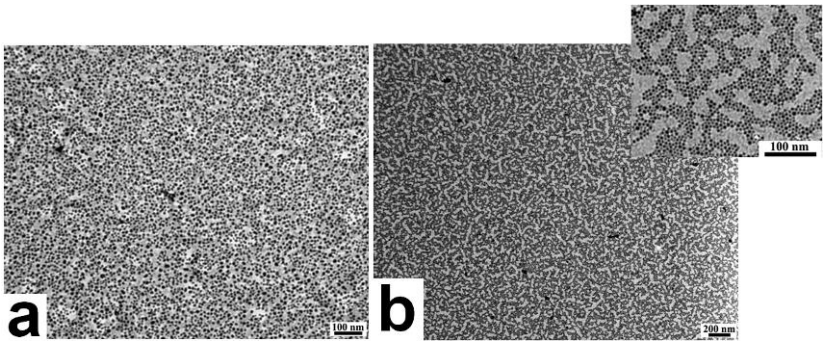


Figura 167. Immagini TEM di un film sottile di PS-b-PMMA depositato su substrato di ITO mediante spin-coating e decorato con nanoparticelle di oro (a), e dopo annealing a 150 °C (b)

Infine, attraverso l'applicazione di campi elettrici esterni, è stata valutata la possibilità di poter ottenere microdomini lamellari di PS-b-PMMA perpendicolari rispetto alla superficie del substrato di ITO e caratterizzati da ordine a lungo raggio, con lamelle di PS e PMMA allineate secondo un'unica direzione. L'analisi TEM di campioni sottoposti a un processo di annealing termico in vuoto in presenza di campo elettrico esterno ad intensità variabile, ha messo in evidenza l'ottenimento di nanostrutture lamellari di PS-b-PMMA che tendono ad allinearsi parallelamente rispetto al campo elettrico applicato. I risultati ottenuti aprono, ad esempio, la strada verso la realizzazione di nuovi dispositivi organici con funzioni che dipendono, esclusivamente, dalle proprietà delle molecole ospiti: dispositivi di memoria non volatile o celle solari organiche ad elevata efficienza.

In collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" è stata svolta un'attività riguardante lo studio e la caratterizzazione di materiali organici per applicazioni fotovoltaiche organiche tramite metodi di spettroscopia ottica avanzata [Report RdS/2012/216].

Uno degli aspetti fondamentali per determinare le prestazioni nei dispositivi organici è che, nonostante essi siano generalmente pensati come dei dispositivi macroscopici, il loro comportamento è fortemente legato a fenomeni di interfaccia che hanno luogo a livello nanoscopico, benché una chiara spiegazione del trasporto di carica nei semiconduttori organici risulta essere, ad oggi, ancora una questione aperta. Metodi molto potenti di analisi del comportamento dei materiali semiconduttori, in particolare organici, sono i metodi elettro-ottici, tramite cui si registra il comportamento elettrico di dispositivi quando sono sottoposti ad illuminazione, e quindi legando tale comportamento alla descrizione microscopica dei materiali e delle interfacce presenti. In particolare, l'analisi della fotocorrente spettrale dinamica e la spettroscopia di generazione di seconda armonica possono fornire utili informazioni per spiegare aspetti del comportamento di dispositivi elettroottici, quali le celle fotovoltaiche organiche, anche investigando i materiali utilizzandoli in altre configurazioni di dispositivo, come gli OFET (Organic Field Effect Transistor).

Pertanto sono state effettuate misure di fotocorrente spettrale risolta nel tempo e misure di spettroscopia di generazione di seconda armonica su materiali semiconduttori organici. Tramite queste caratterizzazioni, si sono

analizzate le proprietà di trasporto e di intrappolamento delle cariche elettriche indotte dall'eccitazione luminosa dei materiali, e gli allineamenti delle bande energetiche in giunzioni di materiali, che determinano le prestazioni di dispositivi fotovoltaici realizzati con essi. Le analisi sono state condotte su due semiconduttori organici, uno di tipo "p", il α-sexithiophene (α-6T), ed uno di tipo "n", il perilene con gruppi ciano (PDI-8CN2), utilizzandoli come semiconduttore in transistor organici ad effetto di campo OFET. Per le misure di fotocorrente spettrale, i dispositivi realizzati con i due materiali sono stati polarizzati elettricamente e quindi irraggiati con luce monocromatica, variando la lunghezza d'onda di eccitazione. Il 6T risponde sempre allo stimolo luminoso, ma con modalità diverse se la lunghezza d'onda applicata è più grande o più piccola di circa 500 nm. Alle lunghezze d'onda più grandi, la luce eccita stati trappola nel semiconduttore, che accumulano cariche all'interfaccia semiconduttore-isolante di gate. Alle lunghezze d'onda più piccole, coerentemente con quanto indicato dallo spettro di assorbimento del materiale, vengono fotogenerate molte cariche che contribuiscono alla conduzione nel OFET, facendo variare la corrente molto rapidamente. Il PDI-8CN2, invece, mostra risposta alla luce soltanto con lunghezze d'onda più piccole di 600 nm, come atteso dall'osservazione dello spettro di assorbimento del materiale. Inoltre, il comportamento sembra influenzato dalla presenza di ossigeno e vapor acqueo atmosferici, che possono indurre modifiche nella struttura del materiale e provocare la formazione di siti trappola. Utilizzando un diverso set-up di misura, si è osservato un comportamento che fa supporre due effetti provocati dalla luce incidente: la fotogenerazione di cariche e la formazione di due tipi di trappole, lente e veloci.

Film di perilene su vetro sono stati analizzati anche con la spettroscopia di generazione di seconda armonica, utilizzando luce polarizzata per eccitare i campioni, osservando quali risonanze sono presenti nel sistema ed individuando le lunghezze d'onda che provocano un apprezzabile segnale non lineare, con la possibilità di determinare l'eventuale presenza di impurezze o droganti, e stabilendo quale tipo di transizione provoca le risonanze d'interfaccia.

Questi tipi di analisi permettono di ottenere importanti informazioni sul comportamento di un semiconduttore organico e quello delle sue interfacce quando è sottoposto ad illuminazione, sulla sua struttura elettronica, e su alcuni meccanismi di degrado delle prestazioni dei dispositivi che lo utilizzino.

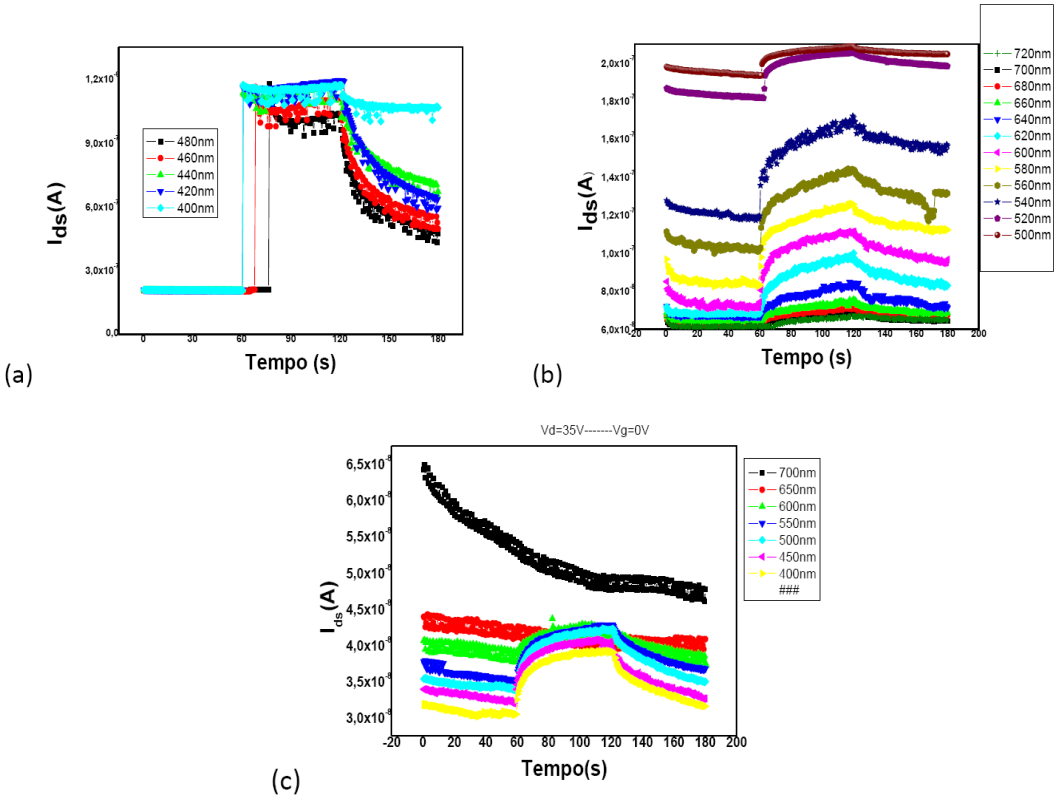


Figura 168. Esempi di misure di fotocorrente spettrale effettuate: (a) (b) OFET di 6T; (c) OFET di perilene

In conclusione si può affermare che i deliverable relativi alla linea E sono stati in gran parte raggiunti. Non è stato condotto uno studio esaustivo sulla stabilità dei dispositivi realizzati. Comunque in tutti i casi, sia per le celle polimeriche realizzate con materiali di nuova sintesi, sia per quelle realizzate con materiali standard ma depositando lo strato attivo tramite tecniche di stampa, non si è osservato un degrado sensibilmente diverso da

quello che si osserva su analoghi dispositivi realizzati con materiali commerciali e tecniche di deposizione da laboratorio (spin coating).

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito del progetto attività sono state avviate collaborazioni con diverse Università e con FN S.p.A. Nel seguito sono riportate il titolo del tema svolto e una breve sintesi delle attività.

Università degli Studi "Federico II" di Napoli, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione

"*Sintesi via sol-gel di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO per applicazioni fotovoltaiche*"

L'attività ha riguardato lo studio e l'ottimizzazione delle condizioni di sintesi tramite tecnica sol-gel di film di ZnO per lo sviluppo di elettrodi frontali a basso costo per celle solari a film sottile. Sono state esplorate diverse strategie, tra loro sinergiche, quali la realizzazione di film multi-strato, il drogaggio con elementi aliovalenti a partire dal B e/o con l'idrogeno, l'utilizzo di valori elevati del pH (campo basico) del mezzo di reazione.

I substrati sono stati utilizzati per realizzare test preliminari di fabbricazione di dispositivi. Tali dispositivi sono tra i primi esempi di celle realizzate su un elettrodo frontale ottenuto via sol-gel.

Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Fisica

"Photon harvesting from nanostructured metallo-dielectric substrates"

I temi sviluppati hanno riguardato lo studio della potenzialità di substrati nanostrutturati come supporti per dispositivi fotovoltaici a film sottile.

L'attività si è orientata principalmente allo sviluppo di processi di nanostrutturazione dei substrati di vetro e degli ossidi conduttori trasparenti (TCO) su di esso supportati allo scopo di indurre l'intrappolamento della radiazione solare nel dispositivo a film sottile di silicio (photon harvesting). Questo risultato è stato conseguito ricorrendo a trattamenti di nanostrutturazione all'interfaccia vetro-TCO volti a replicare gli effetti antiriflesso di sistemi bio-mimetici. La testurizzazione controllata dell'interfaccia di vetro è stata ottenuta tramite processi di erosione ionica auto-organizzata Ion Beam Sputtering - Ion Projection Lithography (IBS-IP). I substrati nanostrutturati sono stati testati realizzando su di essi celle a singola giunzione in silicio amorfo.

Università degli Studi del Sannio, Dipartimento di Ingegneria

" *Validazione sperimentale e ottimizzazione di cristalli fotonici ibridi metallo-dielettrici come strati riflettori posteriori di celle fotovoltaiche a film sottile per migliorare l'intrappolamento della radiazione solare*"

L'attività di ricerca ha riguardato la definizione di nuove architetture di dispositivo che massimizzino l'intrappolamento della radiazione solare nelle celle solari a film sottile. E' stata condotta un'analisi numerica finalizzata allo studio di backreflectors ibridi metallo dielettrici in configurazione aperiodica secondo la serie di Fibonacci. La piattaforma simulativa per le strutture aperiodiche è stata applicata per calcolare l'assorbimento dovuto alla presenza di backreflectors aperiodici, effettuando anche un confronto periodico-aperiodico per quanto riguarda l'aumento di assorbimento prodotto nei due casi. Sulla base dei risultati delle simulazioni sono state effettuate alcune prove per verificare la fattibilità sperimentale delle strutture investigate con un sistema di nano litografia avanzato quale il Focused Ion Beam (FIB).

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Chimica

"Sintesi di nuovi polimeri semiconduttori a bassa gap per celle fotovoltaiche organiche"

Il lavoro svolto ha riguardato la sintesi di nuovi polimeri semiconduttori a bassa gap con caratteristiche strutturali potenzialmente idonee a migliorare le prestazioni fotovoltaiche delle celle solari organiche del tipo polimero-fullerene. Tali materiali sono stati caratterizzati mediante Risonanza Magnetica Nucleare, Gel Permeation Chromatography (GPC), Spettroscopia Infrarossa (IR), Spettroscopia UV-Visibile.

Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Chimica

"Materiali polimerici nano strutturati per il controllo della morfologia su scala nanometrica"

L'attività ha previsto lo sviluppo di un sistema ibrido innovativo in cui un copolimero a blocchi nanostrutturato è selettivamente caricato con nanoparticelle inorganiche conduttive I copolimeri a blocchi hanno suscitato grande interesse nel campo delle nanotecnologie data la loro capacità di auto-organizzarsi in strutture aventi periodicità su scala nanometrica. Le nanostrutture ordinate possono essere utilizzate come matrici (host) per l'inclusione

selettiva di molecole ospiti (guest) in specifici domini ottenendo così una dispersione ordinata e periodica delle nanoparticelle. In questo modo è possibile realizzare nanocompositi con proprietà fisiche speciali. Queste attività aprono la strada verso la realizzazione di nuovi dispositivi organici con funzioni che dipendono esclusivamente dalle proprietà delle molecole ospiti.

Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Fisica

"Studio e caratterizzazione di materiali e dispositivi organici per applicazioni fotovoltaiche organici tramite metodi di spettroscopia ottica avanzata"

L'attività ha previsto la caratterizzazione di materiali e dispositivi organici mediante metodi di spettroscopia avanzata quali la fotocorrente spettrale dinamica e la spettroscopia di generazione di seconda armonica. Tramite queste caratterizzazioni, si sono analizzate le proprietà di trasporto e di intrappolamento delle cariche elettriche indotte dall'eccitazione luminosa dei materiali, e gli allineamenti delle bande energetiche in giunzioni di materiali, che determinano le prestazioni dei dispositivi fotovoltaici realizzati con essi.

Università degli Studi la Sapienza di Roma, Dipartimento di Fisica

"*Caratterizzazione ottica di film sottili per dispositivi fotovoltaici basati su semiconduttori Cu_2-II-IV-VI_4***"**

Il lavoro, già avviato nelle scorse due annualità, ha riguardato la caratterizzazione ottica e strutturale dei film di Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) con lo scopo di ottimizzare il processo di crescita dei materiali. Lo studio sistematico degli spettri di assorbimento dei film di CZTS ha consentito di correlare le variazioni di stechiometria del materiale con le variazioni della gap proibita, col grado di disordine del materiale e con il suo contenuto di difetti. Alcuni di questi risultati sono stati anche confermati da misure di fotoluminescenza.

Università degli studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e Tecnologie Industriali

"Crescita e caratterizzazione chimica, morfologica e strutturale di film sottili per celle fotovoltaiche a base di semiconduttori Cu2-II-IV-VI4"

L'attività si è sviluppata seguendo le seguenti due linee:

- Sviluppo di un processo di deposizione del CZTS da soluzioni contenenti i sali dei tre metalli e tiourea. Le caratterizzazioni mostrano che i campioni, dopo un trattamento ad alte temperature, possiedono buone caratteristiche in termini di composizione, assenza di fasi spurie e proprietà ottiche. Con questi film sono anche stati prodotti alcuni dispositivi fotovoltaici preliminari.
- Implementazione di nuovi metodi per l'analisi dei profili XRD di film di CZTS che hanno permesso, oltre alla tipica analisi strutturale, un'analisi quantitativa delle fasi spurie talvolta presenti nel materiale. Lo stesso procedimento di analisi ha anche permesso di ottenere informazioni sul livello di occupazione dei siti dello stagno che è risultato essere un parametro fondamentale per le caratteristiche optoelettroniche del CZTS.

FN S.p.A.

"Caratterizzazione chimico fisica e microstrutturale di film sottili per celle fotovoltaiche a base di semiconduttori Cu2-II-IV-VI4"

L'attività è consistita nella caratterizzazione termica dei film tramite TGA/DSC (Thermogravimetric Analysis e Differential Scanning Calorimetry). Grazie a queste misure è stato avviato lo studio dei meccanismi fisici (cristallizzazione, dissociazione, evaporazione ecc.) che avvengono durante i trattamenti termici tipici dei processi di crescita del materiale.

Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine e moto ondoso

Il rapido espandersi e il recente significativo sviluppo delle tecnologie per lo sfruttamento delle correnti marine e delle onde impone una riflessione sulle azioni da intraprendere per stimare non solo le risorse teoricamente disponibili nei mari italiani, ma anche quelle realmente sfruttabili dalle diverse tecnologie che si stanno affacciando sul mercato. Per effettuare tale monitoraggio è necessaria una sistematica campagna di analisi effettuata sia con opportuni strumenti numerici, con relativa validazione tramite dati sperimentali misurati, sia tramite stime relative a possibili installazioni connesse con le varie tecnologie attualmente disponibili. E' indubbio, infatti, che secondo la tipologia del sito in analisi, possa essere preferibile scegliere una tecnologia piuttosto che un'altra al fine di ottimizzare e massimizzare la produzione energetica che realisticamente possa essere immessa nella rete elettrica.

In conseguenza di quanto sopra detto, l'attività di ricerca del presente progetto mira a quantificare l'energia che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da appositi convertitori del moto ondoso e correnti marine in siti specifici della costa italiana. La valutazione viene condotta attraverso l'uso integrato di due classi di modelli: il primo riguardante la simulazione del moto ondoso e delle correnti, e il secondo relativo all'interazione idrodinamica tra convertitori di energia e potenziale marino.

Il progetto comprende sia attività a prosecuzione di quelle sviluppate nell'annualità precedente, sia attività di nuova impostazione.

Le attività a prosecuzione dell'annualità precedente riguardano la stima del potenziale energetico del moto ondoso in siti specifici delle aree costiere italiane attraverso l'uso di strumenti innovativi di modellistica numerica oceanografica. I siti sono individuati, a differenza della precedente annualità, con una precisione dell'ordine del chilometro. L'effetto dovuto all'interazione tra moto ondoso e batimetria nelle vicinanze della costa saranno quindi presi in considerazione. I dati di moto ondoso ricavati nel corso dell'annualità precedente hanno consentito la mappatura dell'energia ondosa lungo le coste italiane con una risoluzione orizzontale di circa 7 km. I risultati ottenuti dalle simulazioni a scala di bacino mediterraneo della precedente annualità sono utilizzati come condizioni al contorno per i modelli a più alta risoluzione che saranno sviluppati nel seguito progetto.

Nel dettaglio, l'attività da intraprendere consiste nell'individuazione di aree campione, per ciascuna delle quali si procede ad analizzare i dati di moto ondoso sia al largo (dell'ordine di pochi chilometri) sia sotto costa. L'analisi è finalizzata a determinare sia il clima ondoso e l'energia associata, sia a determinare l'intensità e la frequenza di eventi estremi che sono determinanti durante la fase di progettazione e installazione dei dispositivi di conversione.

L'attività di ricerca è inoltre tesa a valutare il potenziale energetico delle correnti di marea presenti nello Stretto di Messina attraverso simulazioni numeriche tridimensionali realizzate con un modello di circolazione marina non idrostatico e ad elevatissima risoluzione spaziale.

I dati di potenziale energetico delle onde e correnti vengono integrati nello strumento di visualizzazione GIS già sviluppato nel corso dell'annualità precedente.

Le attività di nuova impostazione si riferiscono alla simulazione numerica dell'idrodinamica che si stabilisce tra convertitori di energia e potenziale marino. Lo scopo principale di tali simulazioni è valutare, con la maggiore precisione possibile, l'efficienza del dispositivo elettromeccanico nell'assorbire l'energia dalle onde o correnti e trasformarla in energia elettrica.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'attività di ricerca condotta nel progetto è indirizzata principalmente alla valutazione dell'energia elettrica che si potrebbe ricavare dall'installazione di particolari convertitori del moto ondoso e correnti marine in alcune zone della costa italiana.
Il progetto intende fornire un innovativo e particolareggiato contributo informativo per il supporto alle attività di estrazione dell'energia dal mare. Questo obiettivo viene raggiunto attraverso lo sviluppo di un sistema informativo integrato che fornisce i parametri meteo-marini direttamente legati alle tecnologie di estrazione dell'energia (turbine, convertitori del moto ondoso) con un elevato dettaglio spaziale per la caratterizzazione dei siti più adatti.

L'integrazione in un sistema GIS fornisce dettagli sulle infrastrutture potenzialmente interessate (porti, reti energetiche, etc.) e su parametri ambientali di interesse (vincoli, turismo etc.). Alla base di questo sistema vi è la messa a punto di modelli numerici oceanografici e meteo-marini per la previsione del moto ondoso e della circolazione marina nel bacino del Mediterraneo, e lo studio delle tecnologie attualmente sviluppate per l'estrazione dell'energia marina.

L'obiettivo finale dell'attività è la produzione di mappe di indicatori del potenziale energetico marino a diversa risoluzione spaziale, dai 7 km fino a poche centinaia di metri per i siti costieri italiani che risulteranno caratterizzati da un potenziale energetico significativo. Per questi ultimi viene inoltre valutata la reale quantità di energia estraibile in funzione delle diverse tecnologie di sfruttamento utilizzabili.

Lo sviluppo dell'attività nell'arco della durata del programma è il seguente:

1. Sviluppo di un modello numerico per la simulazione della circolazione marina mediterranea a circa 7 km di risoluzione.
2. Sviluppo di un modello numerico per la simulazione del moto ondoso nel Mediterraneo a circa 7 km di risoluzione.
3. Produzione di mappe degli indicatori del potenziale energetico relative alle simulazioni sul bacino del Mediterraneo.
4. Elaborazione degli indicatori del potenziale energetico marino e creazione di un data-base integrato in un sistema GIS costiero.
5. Sviluppo di modelli numerici ad alta risoluzione spaziale, per la simulazione della circolazione marina per alcuni siti costieri italiani caratterizzati da un potenziale energetico significativo.
6. Sviluppo di modelli numerici, ad altissima risoluzione spaziale, per la simulazione della circolazione marina e del modello del moto ondoso per i siti costieri italiani caratterizzati da un potenziale energetico significativo.
7. Produzione delle mappe degli indicatori del potenziale energetico relative alle simulazioni dei siti costieri italiani caratterizzati da un elevato potenziale energetico.
8. Integrazione del data-base GIS costiero.
9. Analisi dettagliata delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento dell'energia marina.
10. Individuazione delle tecnologie che meglio si adattano ai siti costieri italiani.
11. Quantificare l'energia elettrica che può essere immessa nella rete elettrica, ricavabile da appositi convertitori del moto ondoso e correnti marine.
12. Indicazioni sul possibile sviluppo di tecnologie specifiche per i siti costieri italiani.
13. Divulgazione dei risultati (sito web ENEA dedicato, Organizzazione workshop, rapporti tecnici e articoli su riviste nazionali e/o internazionali).
14. Agire come punto di sintesi e di aggregazione per Ie varie esperienze italiane verso Ia European Energy Research Alliance (EERA).

Nel Piano di Realizzazione 2011 il progetto si articolava in tre obiettivi intermedi. Il primo obiettivo (A) ha riguardato la valutazione del potenziale energetico presente nello stretto di Messina. L'obiettivo B è stato dedicato alla valutazione delle caratteristiche fisiche del potenziale ondoso per alcune regioni campione della costa italiana, infine l'obiettivo C ha riguardato la valutazione del potenziale elettrico erogabile in rete da sistemi di conversione del moto ondoso e correnti di marea.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

L'attività di ricerca condotta nel progetto è stata indirizzata principalmente alla valutazione dell'energia elettrica che si potrebbe ricavare dall'installazione di particolari convertitori del moto ondoso e correnti marine in alcune zone della costa italiana. Il progetto ha visto sia la prosecuzione di alcune attività già iniziate nell'annualità precedente, sia attività di nuova impostazione.

Le attività a prosecuzione dell'annualità precedente hanno riguardato la stima del potenziale energetico del moto ondoso in siti specifici delle aree costiere italiane. Nel dettaglio, l'attività intrapresa è consistita nell'individuazione di aree campione, per ciascuna delle quali si è proceduto ad analizzare i dati di moto ondoso sia al largo, sia sotto costa. L'analisi è stata finalizzata alla valutazione dell'energia associata al clima ondoso, e alla valutazione dell'intensità e la frequenza degli eventi estremi (dati determinanti durante la fase di progettazione e installazione dei dispositivi di conversione).

L'attività di ricerca si è concentrata inoltre sulla valutazione del potenziale energetico delle correnti di marea presenti nello Stretto di Messina attraverso simulazioni numeriche e dati osservati.

Le attività di nuova impostazione sono state invece indirizzate allo studio dell'interazione tra dispositivi meccanici di conversione con il moto ondoso o le correnti di marea. In altre parole sono state valutate le prestazioni, l'efficienza e la quantità di energia che produrrebbero alcuni dispositivi di conversione nel caso venissero installati in alcuni punti della costa italiana.

A. Potenziale energetico dello Stretto di Messina

A.1 Sviluppo di un modello numerico per la simulazione della circolazione marina nello Stretto di Messina

Al fine di ottenere la migliore rappresentazione possibile delle maree nello stretto di Messina sono stati sviluppati due modelli numerici: il primo barotropico (bidimensionale) e il secondo baroclino (tridimensionale). Lo sviluppo di questi due modelli si è reso necessario in quanto i dati relativi alle componenti delle correnti di maree (componenti diurne e semidiurne) necessarie per forzare lateralmente il modello baroclino non sono allo stato attuale disponibili con il necessario dettaglio spaziale. Di conseguenza si è proceduto nel modo seguente: un primo modello barotropico a risoluzione di circa 100 m è stato sviluppato per la regione dello stretto di Messina e regioni limitrofe. Il modello barotropico è stato forzato lateralmente attraverso l'imposizione dell'elevazione superficiale risultante dalla combinazione delle 7 principali componenti di marea. Il modello barotropico così forzato, dopo aver raggiunto la fase di equilibrio, ha girato per un ulteriore ciclo di marea (circa 30 giorni). Al termine della simulazione sono state calcolate ampiezza e fase delle 7 componenti relative alla velocità barotropica da imporre come condizioni al contorno al modello baroclino a più alta risoluzione spaziale.

Il modello baroclino implementato è il MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model). Il modello è implementato ad una risoluzione orizzontale che raggiunge il valore massimo di circa 50 m. Per descrivere nel modo più accurato possibile la dinamica verticale delle correnti di marea sono stati utilizzati 72 livelli verticali che garantiscono una risoluzione verticale di pochi metri in superficie e poche decine di metri alla profondità di 500 metri. Dall'analisi delle strutture di marea ottenute dalla simulazione si può notare come i massimi valori di corrente (2,7 m/s) sono presenti in una zona di mare ad ovest di Punta Pezzo e mostra che i valori più intensi sono dovuti a correnti orientate in direzione NE mentre il massimo in direzione SW è di 2,3 m/s. Per una descrizione completa dell'implementazione dei modelli si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/171.

A titolo di esempio in Figura 169 si riportano ampiezza e fase dell'elevazione per la componente di marea M2 simulata dal modello barotropico POM (Princeton Ocean Model).

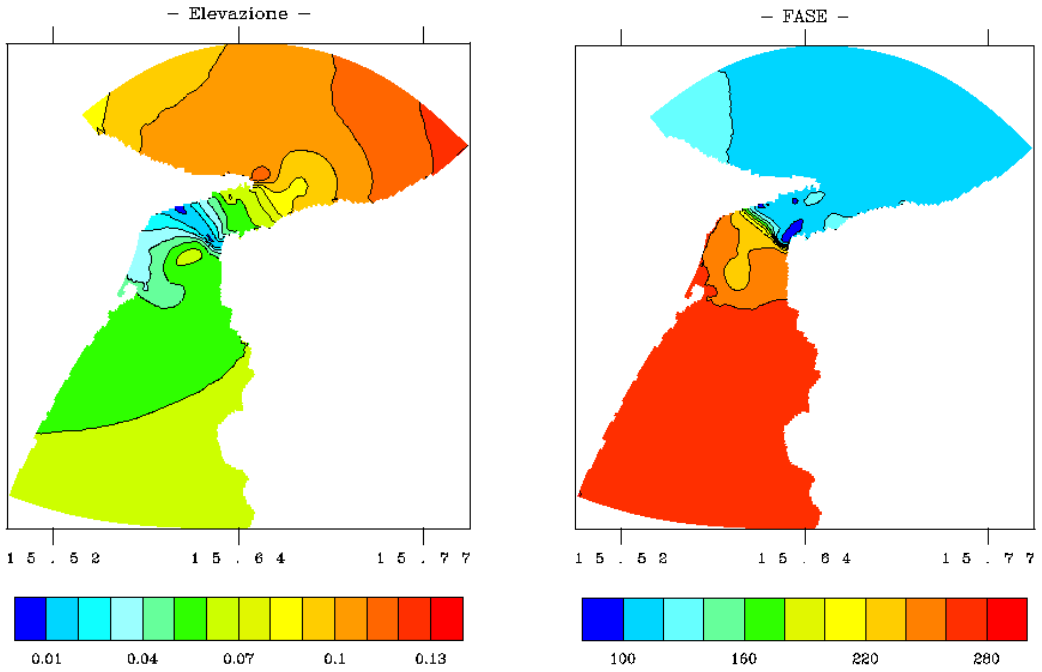


Figura 169. Ampiezza e fase della componenti di marea M2 in cm simulata dal modello POM

Il modello baroclino implementato è il MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model). Il modello è implementato ad una risoluzione orizzontale che raggiunge il valore massimo di circa 50 m. Per descrivere nel modo più accurato possibile la dinamica verticale delle correnti di marea sono stati utilizzati 72 livelli verticali che garantiscono una risoluzione verticale di pochi metri in superficie e poche decine di metri alla profondità di 500 metri. Dall'analisi delle strutture di marea ottenute dalla simulazione si può notare come i massimi valori di corrente (2,7 m/s) sono presenti in una zona di mare ad ovest di Punta Pezzo e mostra che i valori più intensi sono dovuti a correnti orientate in direzione NE mentre il massimo in direzione SW è di 2,3 m/s. Per una descrizione completa dell'implementazione dei modelli si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/171.

A.2 Calcolo delle mappe di potenziale energetico per lo Stretto di Messina

Le stime di produzione di energia elettrica dei dispositivi di conversione sono realizzati a partire dalla conoscenza del potenziale energetico associato alle correnti di marea. La stima del potenziale presente nello stretto di Messina è stato ottenuto attraverso due modalità differenti: l'analisi dei dati del modello baroclino sviluppato in A1, e dalle tavole di marea relative all'anno 2004 (fonte: Istituto Idrografico della Marina). Le tavole di marea forniscono informazioni relative alle ore di picco e calma delle correnti nelle due direzioni di flusso (montante e scendente) e riportano i valori attesi delle velocità di picco nei periodi esaminati. E' bene sottolineare che i dati ricavati dalle tavole di marea sono di fondamentale importanza per comprendere gli andamenti tipici dei profili temporali di velocità nel corso di un anno, ma per il modo in cui sono riportati (indicazione dei soli punti di picco e stanca), tali dati non danno una descrizione dettagliata delle variazioni di velocità della corrente ed in particolare non contengono informazioni di dettaglio sul profilo diurno di velocità. Allo scopo di ottenere una più precisa stima della variazione di velocità nel corso delle 4 inversioni di direzione tipiche giornaliere, è stato necessario effettuare un monitoraggio specifico del profilo di velocità mareale in un punto specifico dello stretto (punto di riferimento), attraverso il quale si sono potute calibrare i dati ottenuti dalle tavole di marea. Per una descrizione completa della metodologia utilizzata si consulti il rapporto tecnico RdS/2012/172.

B. Valutazione delle caratteristiche fisiche del potenziale ondoso per alcune regioni campione della costa italiana

B.1 Sviluppo di modelli ad alta risoluzione per la simulazione del moto ondoso

Nel corso dell'annualità precedente è stata realizzata la climatologia delle onde per il mar Mediterraneo, per il periodo 2001-2010, utilizzando il modello WAM (WAve Model) alla risoluzione spaziale di 1/16°, pari circa a 7 km. Nel corso di questa annualità si è proceduto da una parte ad una caratterizzazione della distribuzione di energia in funzione dell'altezza significativa e del periodo dell'onda, in alcuni siti specifici, e dall'altra alla realizzazione di simulazioni a più alta risoluzione spaziale.

La descrizione delle caratteristiche del clima d'onda è fondamentale, non solo per una stima preliminare dell'energia ricavabile in uno specifico sito, ma anche per la scelta del convertitore di energia più idoneo. A seconda della tipologia del sito, può essere infatti preferibile una tecnologia piuttosto che un'altra al fine di massimizzare la produzione energetica. In Figura 170 è riportato un esempio delle distribuzione in punti lungo la costa occidentale della Sardegna.

L'attività svolta nel corso dell'annualità precedente nella valutazione del potenziale energetico del moto ondoso attraverso strumenti modellistici ha consentito di evidenziare le zone della costa italiana caratterizzati da valori più alti di energia ondosa. I dati delle simulazioni effettuate, sono stati archiviati con una risoluzione temporale di 3 ore e sono stati utilizzati come condizioni al contorno per la realizzazione di simulazioni a più alta risoluzione. In questo caso, per la simulazione in zone costiere, è stato utilizzato il codice SWAN (Simulating WAves Nearshore) che rappresenta una evoluzione del codice WAM che include algoritmi per la rappresentazione dei fenomeni specifici delle acque basse.

Nel corso dell'attività svolta in questa annualità sono state messe a punto simulazioni ad alta risoluzione spaziale (1/120°) per tre zone particolarmente significative dal punto di vista energetico. Queste zone sono state individuate scegliendole dalle mappe prodotte nella precedente annualità e sono costituite dalla costa occidentale della Sardegna, dalla costa nord-occidentale della Sicilia e dall'area circostante l'isola di Pantelleria. Quest'ultimo sito è stato selezionato anche per le particolari difficoltà di approvvigionamento energetico che possono rendere più conveniente la produzione di energia in loco. Per una descrizione approfondita dell'implementazione dei modelli si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/170.

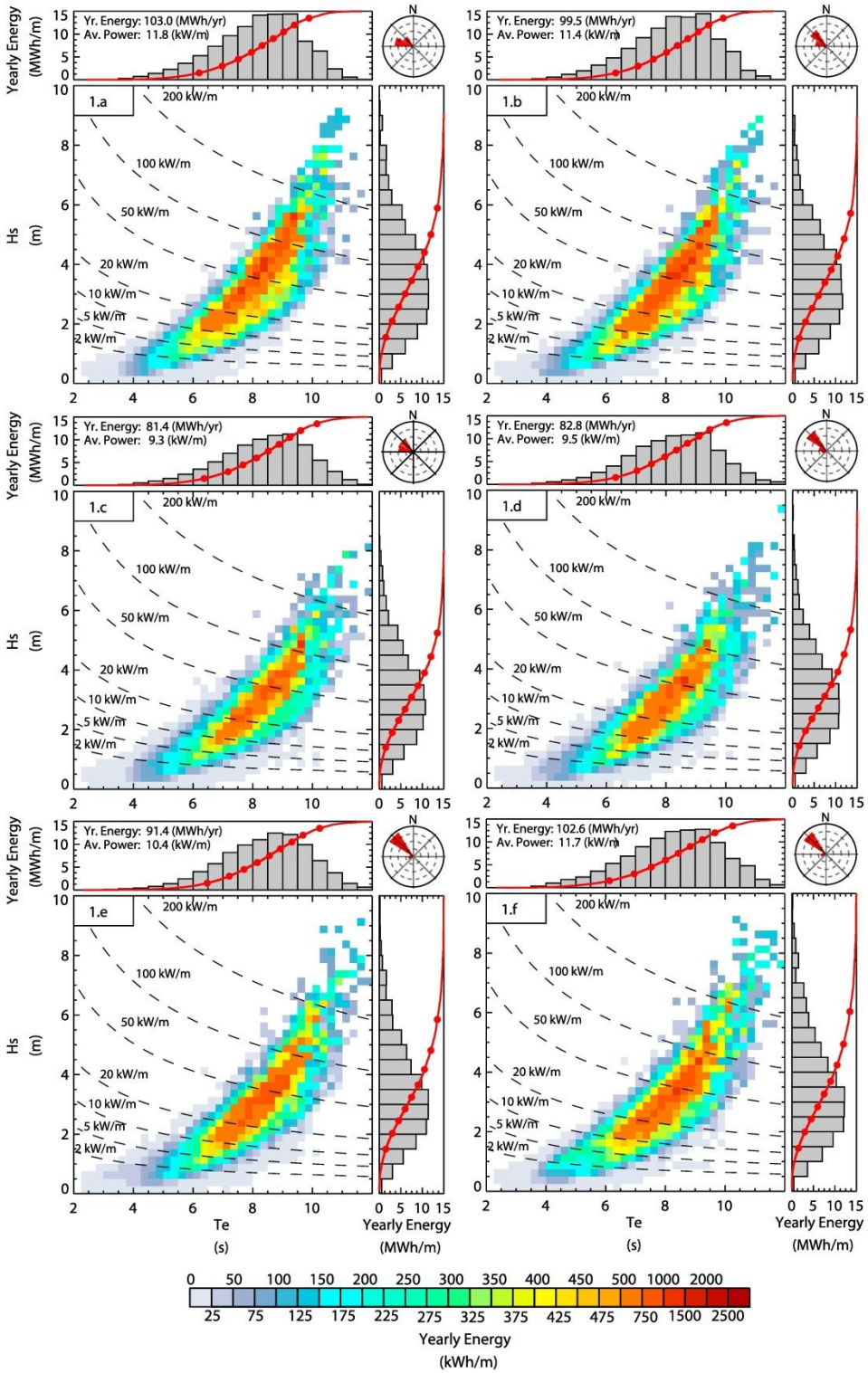


Figura 170. Distribuzione dell'energia da onda in funzione del periodo significativo e dell'altezza significativa in punti collocati lungo la costa occidentale della Sardegna.

Sono state prodotte con il codice SWAN mappe climatologiche dell'energia ondosa media per le tre zone scelte. Il codice è stato forzato con i campi di vento provenienti dalle analisi prodotte dal ECMWF (Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine) relativamente al periodo 2001-2005. Per evidenziare il solo effetto della risoluzione è anche stato effettuato il confronto per la zona circostante l'isola di Pantelleria tra la climatologia realizzata con il codice WAM alle due diverse risoluzioni spaziali (Figura 171). Risulta evidente la differenza di energia calcolata in prossimità della costa rispetto a quella pochi chilometri al largo e la diversa rappresentazione dell'effetto di schermo da parte dell'isola relativamente alla propagazione delle onde verso la zona sud-orientale dell'isola.

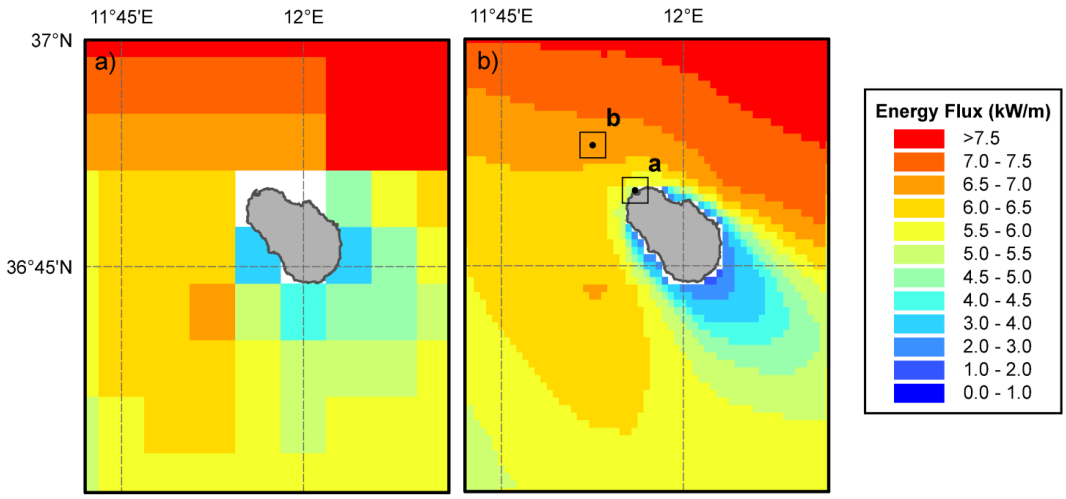


Figura 171. Distribuzione dell'energia media intorno all'isola di Pantelleria. Confronto tra il risultato ottenuto con il modello WAM ad 1/16° ed ad 1/120°

B.2 Valutazione delle caratteristiche fisiche del potenziale ondoso nei siti considerati

Oggetto del presente progetto è l'analisi dei livelli di moto ondoso finalizzata alla realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica da onde di mare, in tre aree campione localizzate lungo le coste italiane. Nello specifico in questo obiettivo, sono state considerate le località di Porto Pischera (Sardegna sud-ovest), Pantelleria e Genova. Per ciascuna località sono stati elaborati i dati di moto ondoso, sia al largo sia sotto costa, al fine di valutare sia le onde estreme sia l'energia associata al moto ondoso. Le aree campione sono state individuate lungo tratti di costa che risultino di interesse per la realizzazione di cassoni portuali di tipo REWEC3.

In ciascuna di tali aree sono stati elaborati dati di moto ondoso per intervalli temporali superiori ai 10 anni al fine di effettuare la stima dei livelli ondosi estremi, al largo. I dati di moto ondoso ed i livelli estremi sono stati poi propagati sotto costa, al fine di determinare i livelli di altezza significativa "locali". I livelli estremi di moto ondoso sono stati, quindi, utilizzati per il predimensionamento di cassoni per la produzione di energia dal moto ondoso per i quali sono state condotte le verifiche di stabilità globale dei cassoni (obiettivo C2). I livelli di moto ondoso "locali", in termini di altezza significativa, periodi e direzione dominante delle onde, sono stati utilizzati per la stima dell'energia del moto ondoso incidente.

Per una descrizione approfondita sulle caratteristiche fisiche del potenziale ondoso nei tre siti considerati si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/231.

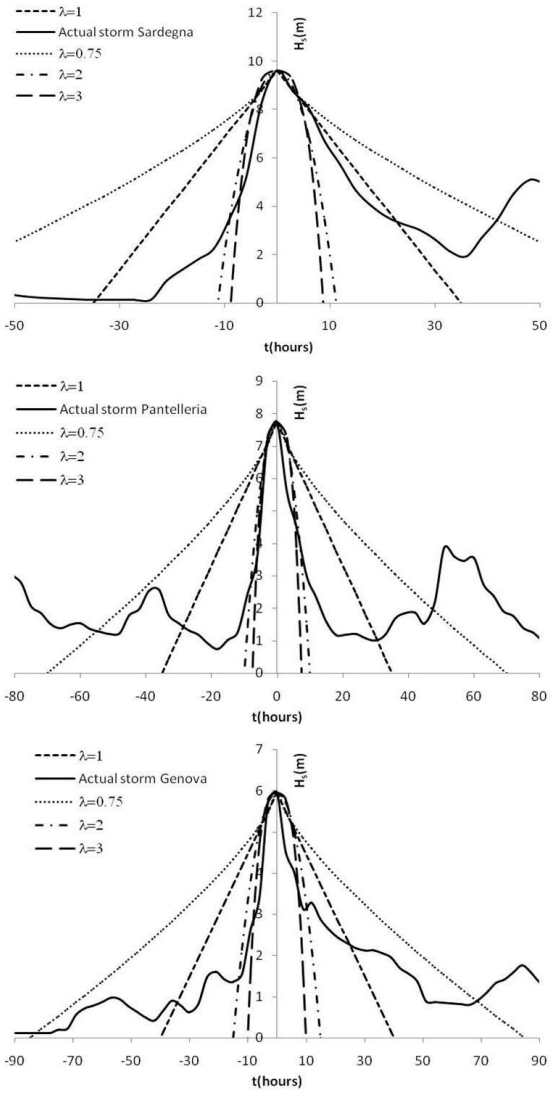


Figura 172. Mareggiate più forti registrate e relative Equivalent Power Storms nelle tre aree considerate

C. Valutazione del potenziale elettrico erogabile in rete da sistemi di conversione del moto ondoso e correnti di marea

C.1 Moto ondoso

Sono state valutate le prestazioni di due convertitori di energia ondosa sviluppati di recente in Italia: REWEC3 (REsonant&Wave& Energy& Converter)!e ISWEC.

- *REWEC3*

I cassoni cellulari in cemento armato (c.a.) a parete verticale sono tra le tipologie costruttive più largamente diffuse per la costruzione di bacini portuali. È possibile modificare opportunamente tali strutture, con l'introduzione nella porzione lato mare di sistemi per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica, quali i tradizionali Oscillating Water Column (OWC) o gli innovativi U-OWC (REWEC3). Lo schema costruttivo di queste strutture è rappresentato rispettivamente in Figura 173 e 174.

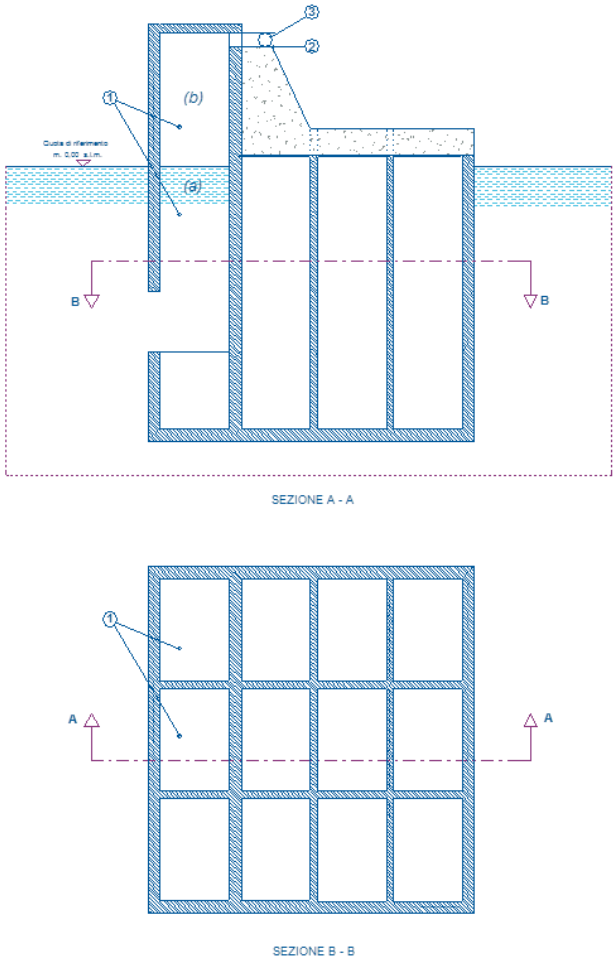


Figura 173. Schema costruttivo di un cassone modificato con tecnologia OWC a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa in energia elettrica

Il dispositivo è costituito da una camera pneumatica (1) in cui viene praticata un'ampia apertura sulla parete verticale lato-mare, attraverso cui viene consentita l'interazione della struttura con l'azione delle onde di mare. Le onde determinano, infatti, attraverso l'apertura inferiore, l'oscillazione della colonna d'acqua (1a) e quindi dell'aria (1b) contenute entrambe all'interno della camera, rispettivamente, nella sua parte inferiore ed in quella superiore. L'aria viene, pertanto, forzata all'interno ed all'esterno della camera attraverso un condotto (2) posizionato nella parte superiore della stessa, generando una corrente d'aria alternata. L'installazione di una turbina self-rectifying (3) e del relativo generatore elettrico nel condotto (2) permettono di sfruttare il flusso d'aria per generare corrente elettrica. Lo schema costruttivo di un impianto di tipo REWEC3 (REsonant Wave Energy Converter) per la conversione di energia ondosa in energia elettrica, collocato nella parte lato mare di un tradizionale cassone portuale cellulare, è riportato in Figura 174. Il cassone modificato è costituito da un condotto

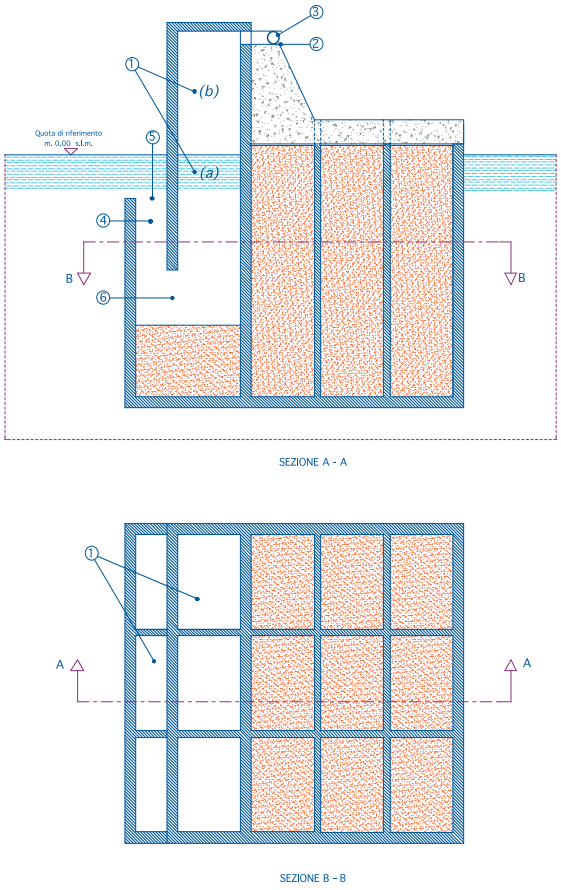


Figura 174. Schema costruttivo di un cassone modificato con tecnologia REWEC3 (U-OWC/3) a celle indipendenti per la conversione di energia ondosa in energia elettrica

verticale (4) nella parte anteriore interagente con il moto ondoso incidente attraverso un'imboccatura superiore (5). Tale condotto è, poi, collegato ad una camera di assorbimento (1) attraverso una luce di fondo (6). La camera (1) è posta in contatto con l'atmosfera mediante un condotto (2) nel quale è alloggiata una turbina self-rectifying (3). La camera di assorbimento (1) è inoltre dotata di uno sfiato, mediante un ulteriore condotto che collega detta camera all'atmosfera, il quale consente la sicurezza ed il corretto funzionamento dell'impianto anche senza turbina, o con turbina non attiva. All'interno della camera di assorbimento è contenuta una massa d'acqua (1a) nella parte inferiore ed aria (1b) nella parte superiore. Per effetto del campo di moto ondoso interagente con la struttura, si instaurano sull'imboccatura del condotto verticale (5) delle fluttuazioni di pressione, che determinano delle oscillazioni all'interno della massa d'acqua contenuta nel condotto e nella camera di assorbimento, corrispondenti alle fasi di cresta e di cavo d'onda. Conseguentemente, la sacca d'aria all'interno della predetta camera (1b) viene alternativamente compressa ed espansa, generando una corrente alterna all'interno del condotto (2) che collega la camera con l'atmosfera, capace di mettere in funzione la turbina self-rectifying (3). Rispetto ad un tradizionale OWC, un impianto REWEC3 risulta costituito dall'addizionale condotto verticale [elemento (4) di Figura 174] che è collegato alla camera di assorbimento mediante un tubo ad U nella parte anteriore della diga lato mare. Per questo motivo, tali impianti possono essere considerati degli U-OWC. La differente configurazione strutturale determina delle significative differenze nell'idrodinamica che si instaura all'interno della struttura e, quindi, modifica sostanzialmente, in termini di resa e di efficienza, i risultati prodotti dai due diversi tipi di impianti.

Per quanto riguarda REWEC3, la prima fase di attività svolta nel seguente progetto è stata dedicata allo studio del dimensionamento del cassone REWEC3 per una sua ipotetica installazione nei seguenti siti: Porto Pischera in Sardegna, Pantelleria e Genova. Per ognuno di questi siti è stato valutato il periodo proprio di oscillazione dell'impianto, le sue condizioni di risonanza, e l'idrodinamica del moto dell'acqua e dell'aria all'interno dell'impianto in configurazione a celle indipendenti. I dati relativi agli eventi estremi di moto ondoso che caratterizzano i tre siti prescelti sono stati successivamente utilizzati per valutare le dimensioni necessarie a garantire la necessaria stabilità globale ai cassoni REWEC3. In particolare per tutte e tre le località: Porto Pischera in Sardegna, Pantelleria, Genova, oggetto di studio, è stata considerata una configurazione standard della porzione attiva della struttura, avente larghezza del condotto verticale di 2 m, larghezza della camera di assorbimento di 4 m, altezza della luce di collegamento condotto verticale/camera di assorbimento di 3 m, affondamento della

quota superiore del condotto verticale di 2 m. Tale geometria è tale da garantire soddisfacenti rese di conversione di moto ondoso incidente per il Mare Mediterraneo. La parte tradizionale del cassone REWEC3 è stata, invece, dimensionata, affinché la struttura nel complesso assolva al requisito della stabilità globale sotto l'azione degli eventi massimi. Per tutte e tre le località è risultato che la struttura considerata è, in definitiva, ben verificata a stabilità globale. Sempre per i tre siti considerati è stata poi stimata la produzione elettrica di un impianto REWEC3 a celle indipendenti. Per tutte le località è stata considerata una configurazione standard della porzione attiva della struttura, definita da una larghezza del condotto verticale di 2 m, da una larghezza della camera di assorbimento di 4 m, da un'altezza della luce di collegamento condotto verticale/camera di assorbimento di 3 m e da un affondamento della quota superiore del condotto verticale di 2 m. Nello specifico sono state calcolate le stime di produzione per un REWEC3 aventi celle di assorbimento comunicanti tra di loro, in maniera tale che si assume che una turbina di tipo Wells è messa in comunicazione con 3 celle adiacenti. Le caratteristiche della turbina monoplana sono: un diametro di 1,5 m e una velocità angolare di 3.000 giri/minuto. I risultati della procedura descritta per i tre siti in esame, mostrati Tabella 27 evidenziano che sia il sito di Porto Pischera che quello di Pantelleria garantiscono una elevata produzione di energia. Al contrario il sito di Genova fornisce valori di produzione tra 4 e 5 volte più bassi rispetto a quelli degli altri siti considerati. Per una descrizione approfondita sulle prestazioni di REWEC3 si consulti il rapporto tecnico RdS/2012/231.

Tabella 27. Stima della energia prodotta dal sistema U-OWC per i tre siti in esame in termini di produzione annua per turbina e di energia media per unità di lunghezza della diga

	Produzione [MWh/anno/turbina]	*E_{med} [kW/m]*
Genova	41,62	0,37
Porto Pischera	210,34	1,85
Pantelleria	149,24	1,31

- *ISWEC*

Il secondo sistema di conversione analizzato, è stato ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter), il cui prototipo è stato realizzato dal Politecnico di Torino. Il suo principio di funzionamento è basato sull'utilizzo di un sistema giroscopico installato su uno scafo galleggiante in grado di oscillare su un grado di libertà rispetto allo scafo. Lo schema strutturale del sistema è riportato in Figura 175.

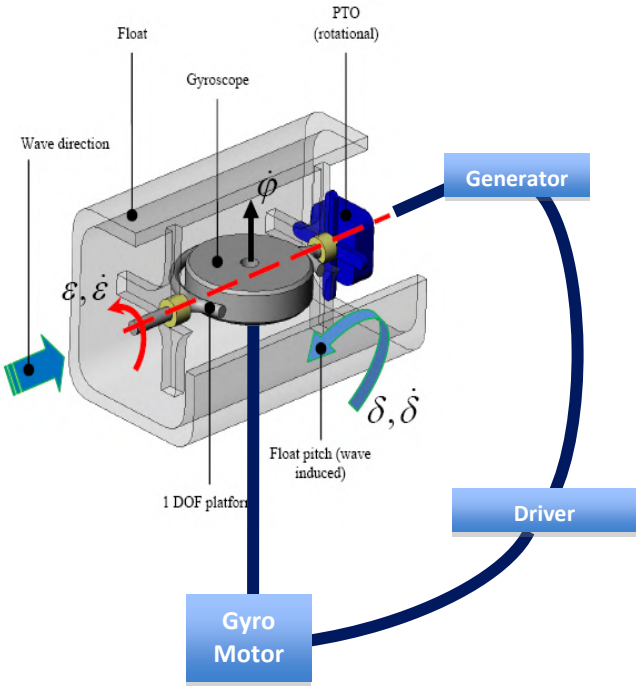


Figura 175. Schema di insieme del sistema ISWEC

Lo scafo è caratterizzato da una forma che garantisce l'auto-allineamento con la direzione di incidenza delle onde: questa caratteristica funzionale può essere realizzata con un'opportuna deriva posteriore avente funzione di timone, in grado di generare un momento raddrizzante sull'asse di imbardata e da opportuni sistemi di ormeggio. In questo modo il moto ondoso incidente indurrà sullo scafo un movimento prevalentemente di beccheggio. All'interno dello scafo è alloggiato il convertitore giroscopico che quindi sarà soggetto al moto di beccheggio indotto sullo scafo dalle onde incidenti, rappresentato dalla rotazione δ . Con riferimento alla figura C5 in sintesi: l'onda incidente di prua induce il moto di beccheggio δ; $\dot{\delta}$. Tale moto di beccheggio si combina con la velocità angolare $\dot{\phi}$ del giroscopio e genera un moto di precessione ε e una coppia di precessione T_ε lungo l'asse del generatore.

I parametri di regolazione sui quali è possibile agire per l'ottimizzazione della potenza sono:

- *C* Smorzamento torsionale imposto all'albero del generatore (controllo potenza attiva)
- *K* Rigidezza torsionale imposta all'albero del generatore (controllo potenza reattiva)

- $\dot{\phi}$ Velocità di rotazione del giroscopio

I parametri di controllo intervengono in diversi punti del sistema: due sono impostati sul driver di controllo del generatore (*c*, *k*) e il terzo sul motore del giroscopio (velocità di rotazione $\dot{\phi}$). La coppia scambiata tra generatore elettrico e gruppo giroscopico è pari a $T_\varepsilon = k\varepsilon + c\dot{\varepsilon}$ e la potenza meccanica in ingresso al generatore è pari a $P_{gen} = T_\varepsilon \cdot \dot{\varepsilon}$.

La perturbazione del moto del giroscopio, provocata dalle onde che inducono il moto di beccheggio δ; $\dot{\delta}$ dello scafo, genera una reazione T_δ lungo l'asse di beccheggio, che si oppone al moto di beccheggio. La potenza assorbita dallo scafo è pari a $P_{scafo} = T_\delta \cdot \dot{\delta}$ e rappresenta la potenza estratta dal moto ondoso, che risulta attenuato a valle del sistema ISWEC. Il moto di beccheggio δ; $\dot{\delta}$ dello scafo è dato dall'equilibrio dinamico tra le azioni esercitate dal moto ondoso sullo scafo e le coppie esercitate dal gruppo giroscopico sullo scafo T_ε e T_δ . La regolazione dei due parametri c e k impone quindi la legge di riferimento della coppia del generatore elettrico e agiscono quindi sulla conversione dell'energia da meccanica ad elettrica. Il parametro ϕ agisce viceversa sulle caratteristiche dinamiche dell'intero sistema di conversione ed è un parametro che influisce sulla frequenza di massima risposta quando questo è sollecitato da un'onda: la sua variazione seguirà, di fatto, la variazione della lunghezza d'onda che incide sullo scafo, consentendo ad ISWEC l'adattabilità su diverse lunghezze d'onda incidente.

Definito così il sistema ISWEC (tramite le equazioni del moto dei suoi componenti), assegnati i parametri di controllo (c, k, $\dot{\phi}$), e assegnati i parametri caratteristici del moto ondoso è stato possibile procedere al calcolo della produttività del convertitore ISWEC. In particolare, assegnata lo stato del mare in ingresso il modello determina l'azione dell'onda sullo scafo. Tale azione è quella che trasferisce energia dal mare al sistema (Figura 176).

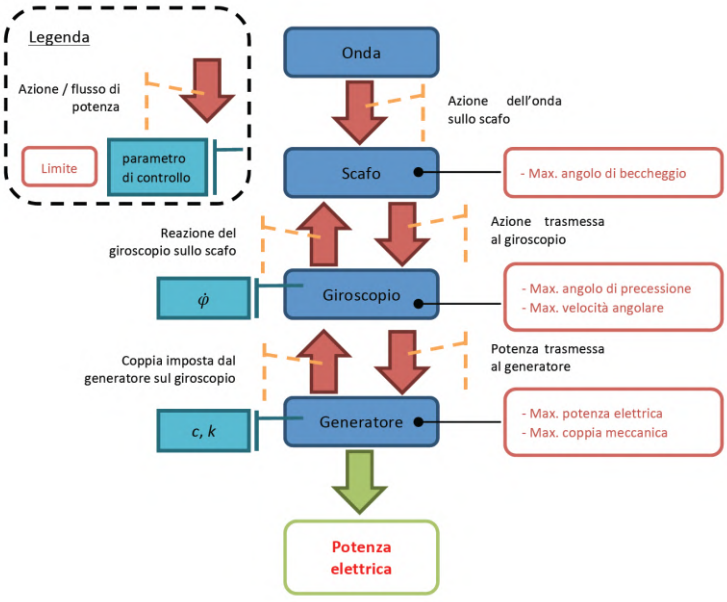


Figura 176. Schema concettuale del modello e dei limiti usati nella linearizzazione

Una volta che sono stati assegnati i parametri caratteristici del moto ondoso, il metodo di ottimizzazione dei parametri di controllo (c, k, $\dot{\phi}$) del sistema ISWEC agisce secondo lo schema di Figura 177.

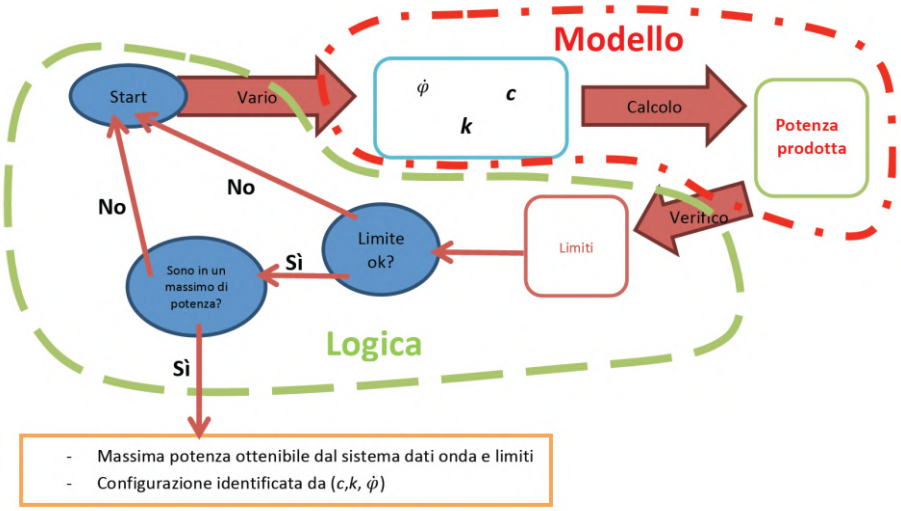


Figura 177. Schema concettuale del processo di ottimizzazione

Il procedimento è iterativo ed inizia assegnando una configurazione iniziale dei parametri di controllo (c, k, $\dot{\phi}$), con cui si può valutare Il moto del gruppo giroscopico ε; $\dot{\varepsilon}$ e il moto di beccheggio dello scafo δ; $\dot{\delta}$, determinando così la potenza prodotta dal sistema. A questo punto è possibile procedere con la verifica dei limiti. Nel caso i limiti non siano soddisfatti, si variano i parametri di controllo per rientrare nei limiti. Nel caso siano soddisfatti si cerca un massimo di potenza restando all'interno dei limiti e, una volta trovato, l'algoritmo termina fornendo in uscita la potenza prodotta e la configurazione dei parametri di controllo (c,k,) necessari ad ottenere tale potenza. Con i metodi precedentemente descritti è possibile procedere al calcolo della produttività del convertitore ISWEC e alla sua massimizzazione per ogni condizione di moto ondoso. Definito l'intero clima di mare annuale sotto forma di scattering table, è possibile stimare la produttività annuale del sistema. Per ogni elemento della scattering table il modello valuta la condizione ondosa in ingresso al sistema ISWEC, procede con l'ottimizzazione dei parametri di controllo (c, k,) e valuta la potenza erogata. In particolare è stata calcolata l'energia prodotta da un sistema ISWEC della potenza nominale di 60 kW posta nel sito di Pantelleria (Figura 178).

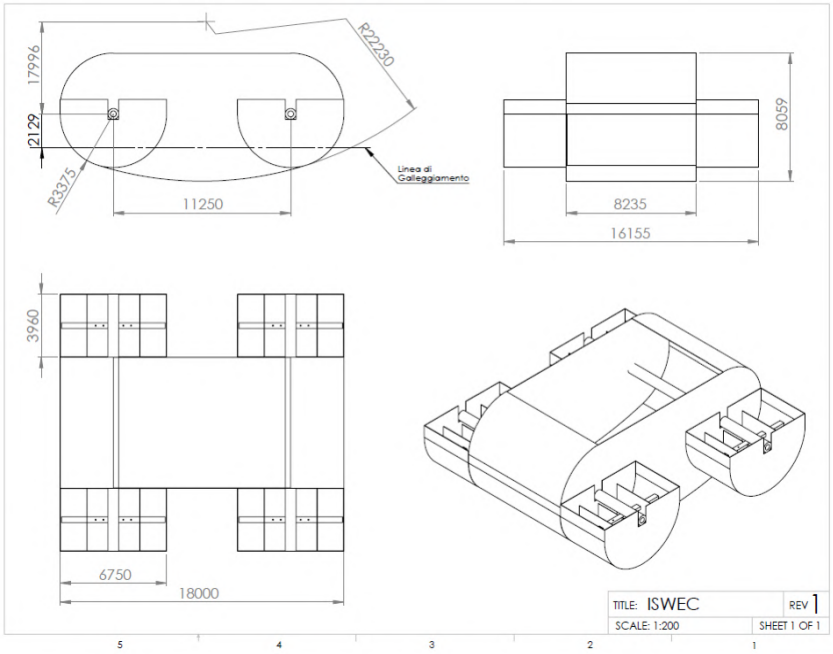


Figura 178. Rappresentazione dello scafo impiegato per il sistema da 60 kW

Il sistema produce una potenza lorda media annuale di 31,5 kW corrispondenti ad un'energia annua lorda prodotta di 276,3 MWh. Per una descrizione approfondita sulle prestazioni di REWEC3 si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/173.

C.2 Correnti di marea

È stata valutata l'energia che si riuscirebbe a produrre dalla conversione delle correnti di marea presenti nello stretto di Messina da parte di alcuni sistemi di conversione. In particolare sono stati considerati i sistemi MCT SeaGen, KOBOLD, GEM, Fri-El e Verdant Power-

- Il sistema SeaGen è costituito da una coppia di turbine idrauliche montate su una torre di supporto rigidamente ancorata al fondo del mare. Le turbine sono montate su un braccio che può essere sollevato fino alla superficie per scopi di manutenzione e immerso alla profondità di esercizio. Il sistema è stato installato in diversi siti di prova ed in diversi modelli e dimensioni. In particolare è presente sia un modello in cui è prevista una piattaforma affiorante, mentre per fondali più profondi è previsto un sistema completamente sommerso.
- Il sistema Kobold, progettato in collaborazione con il dipartimento di Progettazione Aeronautica dell'Università di Napoli a partire dagli anni '90, è stato realizzato in prototipo dalla società "Ponte di Archimede". Il sistema prevede una turbina ad asse verticale montata su un albero connesso ad un generatore elettrico installato a bordo di una boa galleggiante in grado di fornire le necessarie caratteristiche di tenuta al mare.
- Il sistema GEM, anche denominato "aquilone del mare", consiste in una struttura galleggiante che supporta due turbine idrauliche, eventualmente intubate in alcune configurazioni, per incrementare l'efficienza della conversione energetica [8]. La struttura è collegata attraverso un cavo di ormeggio ad un ancoraggio al fondo marino, costituito anche da un semplice corpo morto. Il sistema può orientarsi autonomamente nella direzione della corrente, consentendo l'utilizzo del sistema anche in regimi di correnti alternanti.
- Il sistema Fri-El, sviluppato dalla FRi-El SpA, con la collaborazione dell'università di Napoli [11], è costituito da una serie di turbine idrodinamiche ad asse orizzontale montate su un albero snodato, denominato filare, composto da una successione di tubi di opportuna lunghezza connessi tra loro mediante giunti cardanici. Ciascun filare è connesso ad una generatore installato su un pontone galleggiante: ciò fornisce il vantaggio di evitare parti elettriche immerse.
- Il sistema Verdant Power Free Flow è costituito essenzialmente da una singola turbina tripala ad asse orizzontale installata su una torre di supporto carenata e fissata al fondale. Il sistema è completamente sommerso, riducendo l'impatto visivo e l'interferenza con altre attività. La turbina è regolata a stallo ed è montata su una navicella in configurazione downstream. L'unità di produzione è fornita di un sistema di rotazione di imbardata che consente l'allineamento passivo alla corrente, consentendone il funzionamento in diverse direzioni di flusso.

Per una descrizione completa dei dispositivi si consulti il rapporto tecnico RdS/2012/172.

Allo scopo di effettuare stime confrontabili e di avere ingombri paragonabili dei diversi sistemi, si è assunto che le singole unità installate abbiano tutte la stessa potenza massima pari a circa 1 MW. Le dimensioni delle strutture sono in prima approssimazione state scalate proporzionalmente ai diametri delle turbine. I dettagli realizzativi e le conseguenze sulla realizzabilità delle singole installazioni sono stati ritenuti trascurabili nella presente stima generale di produzione.

Si è proceduto quindi ad un confronto tra i diversi sistemi di conversione considerati. In particolare, si è valutato, per le diverse tecnologie considerate, gli aspetti relativi alla efficienza del sistema, alle difficoltà di installazione e all'impatto sull'ambiente marino. Si riportano di seguito tre tabelle riassuntive delle efficienze delle turbine prese in esame, e delle loro caratteristiche tecniche ed operative.

Tabella 27. Stima della energia prodotta dal sistema U-OWC per i tre siti in esame in termini di produzione annua per turbina e di energia media per unità di lunghezza della diga

Sistema	Coefficiente di potenza massimo CPmax
MCT SeaGen	0,46
Kobold	0,30
GEM	0,75
Fri-el	0,32
Verdant Power	0,34

Tabella 28. Caratteristiche tecniche ed operative

Sistema	Presenza di parti in superficie	Possibilità di variazione della profondità operativa	Tipo di ancoraggio	Possibilità di imbardata per allineamento alla corrente	Facilità di manutenzione
MCT Seagen	Sì (anche se esiste una possibile versione senza piattaforma di superficie)	Sì	Fisso al fondo marino con fondazioni sottomarine e torre di sostegno	No (anche se in alcun soluzioni è possibile variare l'angolo di calettamento delle pale)	Media per il sistema con piattaforma in superficie (possibilità di sollevare le turbine)
Kobold	Sì	No	Galleggiante ormeggiato, con boa di sostegno in superficie	Non necessaria (turbina ad asse verticale)	Media (Parti elettriche emerse)
GEM	No	Sì	Galleggiante con ormeggio flessibile al fondo (Ancoraggio e cavo di ormeggio)	Sì	Buona (possibilità di emersione con controllo della lunghezza del cavo di ormeggio ed eventuale rimozione e spostamento in cantiere)
Fri-El	Sì	No	Galleggiante ormeggiato, con pontone di sostegno della parte elettrica in superficie	Sì (anche se la rotazione può risultare difficoltosa per sistemi snodati di grandi dimensioni)	Media (parti elettriche su pontone emerso)
Verdant Power	No	No	Struttura di supporto fissa posata sul fondo con palo di sostegno e navicella rotante	Sì	Bassa (Complessità delle operazioni di intervento sottomarino)

Tabella 29. Occupazione delle aree, impatto ed interferenza con altre attività

Sistema	Ingombro operativo e densità di installazione	Impatto visivo	Interferenza con attività marine (navigazione, pesca)
MCT Seagen	Alta	Sì (presenza della piattaforma)	Sì
Kobold	Media	Sì	Sì
GEM	Alta	No	No (tranne nelle fasi di manutenzione in emersione)
Fri-El	Bassa	Sì	Sì
Verdant Power	Media	No	No (anche se, su fondali bassi può interferire con l'uso di reti profonde)

In base alle caratteristiche tecniche dei diversi sistemi è possibile indicare i livelli di costo attesi per ciascun sistema nelle fasi di installazione funzionamento.

Tabella 30. Indicazioni sui costi attesi

Sistema	Costo di installazione	Costo di manutenzione ordinaria	Costo di manutenzione straordinaria
MCT Seagen	Alto (fondazioni sottomarine)	Medio basso	Medio (struttura sommersa di difficile rimozione)
Kobold	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
GEM	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
Fri-El	Medio Basso (tranne che per fondali molto profondi)	Basso	Basso (Possibilità di trasporto in cantiere)
Verdant Power	Medio alto (installazione fissa su appoggio tripode)	Medio	Medio Alto (struttura sommersa)

Di seguito sono riportate le dimensioni calcolate per ogni dispositivo per ottenere 1 MW.

Tabella 31. Dimensioni caratteristiche per il sistema MCT SeaGen (asse orizzontale)

Raggio turbina	R=10,15 m
Diametro turbina	D=20,3 m
Superficie frontale	S=647 m^2 *{due turbine)*
Ingombro laterale geometrico	ΔW_g = Lat. Size=3D=60,9 m (2 turbine + supporto *dimensioni stimate)*
Ingombro longitudinale geometrico	ΔL_g= Front Size=2*R=20,3 m
Distanza di sicurezza laterale	ΔL_C= Lat Clearance=2,5*D=50,75 m
Distanza di sicurezza longitudinale	ΔW_C= Front Clearance =10*D=203 m

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema SeaGen produrrebbe una potenza massima di 1000,8 kW alla velocità di 2,0 m/s.

Tabella 32. Dimensioni caratteristiche per il sistema Kobold (asse verticale)

Raggio della pala	R=15,75 m
Diametro turbina	D=31,5 m
Altezza della pala	H=33 m
Superficie frontale	S=(2*R)*H=992 m^2
Ingombro laterale geometrico	ΔW_g= Lat, Size=2,5*R=39,375 m
Ingombro longitudinale geometrico	ΔL_g= Front Size=2,5*R=39,375 m
Distanza laterale	ΔL_C= Lat, Clearance =2,5*D=78,75 m
Distanza longitudinale	ΔW_c=Front Clearance =10*D=315 m

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Kobold produrrebbe una potenza massima di 1000,6 kW alla velocità di circa 2,02 m/s.

Tabella 33. Dimensioni caratteristiche per il sistema GEM (asse orizzontale)

Raggio turbina:	R=7,95 m
Diametro turbina:	D=15,9 m
Superficie frontale:	S=397 m^2 *(due turbine)*
Ingombro laterale geometrico:	ΔW_g=Lateral Size=2,5*D_{shroud}=52,35 m
Ingombro longitudinale geometrico	ΔL_g=Front Size= Lat. Size =52,35 m
Distanza laterale	ΔL_C= Lat, Clearance =2,5*D=25,35 m
Distanza longitudinale	ΔW_c=Front Clearance =10*D=209 m

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema GEM produrrebbe una potenza massima di 1001,1 kW alla velocità di 2,02 m/s.

Tabella 34. Dimensioni caratteristiche per il sistema Fri-El (asse orizzontale) rotazione del sistema complessivo

Numero filari	N_fil=4
Numero turbine per filare	Nturb=3
Raggio turbina	R=5m
Diametro turbina	D= 10 m
Superficie frontale	S=942 m^2 *(tre turbine per due filari*
Larghezza min filari	Wmin=95 m
Larghezza max filari	Wmax=150 m
Distanza turbina-turbina su un filare	dist _turb=75,8 m
Lunghezza palo inclinato	L_incl=22,9 m
Lunghezza totale	Ltot=250,4 m
Ingombro laterale geometrico	ΔW_R=Lateral Size=Wmax= 150 m
Ingombro longitudinale geometrico	ΔL_g=Front Size= 1.5*Ltot = 375,6 m
Distanza laterale	ΔL_c=Lateral Clearance=2,5*Ltot = 626 m
Distanza longitudinale	ΔW_c=Front Clearance=2,5*Ltot = 626 m

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Fri-El produrrebbe una potenza massima di 1001,1 kW alla velocità di 2,02 m/s.

Tabella 35. Dimensioni caratteristiche per il sistema Verdant Power (asse orizzontale)

Raggio turbina	R= 16,8 m
Diametro turbina	D= 33,6 m
Superficie frontale	S=887 m^2 *(due turbine)*
Ingombro laterale geometrico	ΔW_g=Lateral Size=2,5*D= 84 m
Ingombro longitudinale geometrico	ΔL_g=Front Size= D = 34 m
Distanza laterale	ΔL_c=Lateral Clearance=2,5*D = 84 m
Distanza longitudinale	ΔW_c=Front Clearance=10*D = 336 m

Adottando tali dimensioni, una ipotetica unità del sistema Verdant Power produrrebbe una Potenza massima di 1001,4 kW alla velocità di 2,02 m/s.

Una descrizione estesa e particolareggiata della stima di produzione dei vari sistemi considerati anche in formazione multipla è presente nel rapporto tecnico RdS/2012/172.

A scopo di confronto in Tabella 36 si riportano le stime di produzione basate sulle letture dei dati rilevati nella stazione correntometrica posta nello stretto di Messina in prossimità di Punta S. Raineri, sul versante di Messina.

Tabella 36. Energia annua prodotta in base ai rilievi della stazione presso punta S. Raineri - Stime basate sulle velocità interpolate a -5 m di profondità

Sistema	Velocità massima (m/s)	Area sito (km^2)	Numero di unità installate	Potenza installata (MW)	Energia annua prodotta (GWh)
MCT SeaGen	2,39	1,03	41	41	48,7
Kobold			23	23	27,3
GEM			37	37	44,0
Fri-EI			2	2	23,8
Verdant Power			16	16	19,0

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nel progetto sono state coinvolte l' Università Mediterranea di Reggio Calabria, il Politecnico di Torino e l'Università Federico II di Napoli.

Università degli Studi 'Mediterranea' di Reggio Calabria, Dipartimento Meccanica e Materiali

Oggetto dell'accordo con l'Università Mediterranea di Reggio Calabria è stato l'analisi dei livelli di moto ondoso finalizzata alla realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica da onde di mare, in aree campione.

Queste attività ricadono all'interno degli obiettivi B e C1 il lavoro svolto nello specifico ha riguardato:

- elaborazione dati di moto ondoso in aree campione al largo per lo studio delle mareggiate estreme e previsioni direzionali. Nello specifico sono state individuate tre aree campioni per le quali si è proceduto al calcolo del clima medio del moto ondoso, livelli di mareggiate estreme, probabilità e periodi di ritorno.
- propagazione sotto costa dei dati di moto ondoso nelle tre aree campione e stima dell'energia ondosa. La propagazione del moto ondoso sotto costa è stato realizzato mediante il modello numerico MIKE21-SW.
- descrizione generale di un cassone portuale in cemento armato (c.a.) modificato per la conversione dell'energia ondosa in energia elettrica mediante un innovativo U-OWC e dimensionamento di massima di un impianto REWEC3/3 a celle indipendenti. Studio della stabilità globale dei cassoni REWEC3 e calcolo delle azioni stabilizzanti.
- stime di massima della produzione di energia di un impianto Rewec3/3 a celle indipendenti e comunicanti per le tre località oggetto di studio.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Oggetto della collaborazione era la vvalutazione del potenziale elettrico erogabile dal dispositivo ISWEC. L'attività che ricade all'interno dell'obiettivo C1 ha riguardato:

- la descrizione del sistema ISWEC: identificazione della taglia e dei componenti costitutivi (giroscopio, scafo e generatore elettrico) e stima di produttività annua;
- l'ottimizzazione dei parametri di regolazione e funzionamento del sistema ISWEC;
- l'acquisizione e analisi di dati sperimentali relativi al moto ondoso di Pantelleria, determinazione delle scattering table e verifica del potenziale energetico. Stima della produttività di un sistema prototipale da 60 kW a Pantelleria.

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale

Oggetto dell'accordo era la "Stima del reale potenziale energetico italiano derivante dalle correnti di marea". L'attività che ricade all'interno degli obiettivi A e C2 ha riguardato:

- la descrizione di 5 dispositivi di conversione di energia (MCT SeaGen, Kobold, GEM, Fri-El , Verdant Power) e stima delle curve di potenza ed efficienza dei generatori;
- il confronto dei diversi sistemi di conversione con un focus particolare sull'efficienza di conversione, caratteristiche tecniche, problematiche di installazione e impatto sull'ambiente marino;
- la valutazione della produzione energetica dal singolo dispositivo e da un array composto da più dispositivi. Calcolo della distanza tra dispositivi ed effetti di scia;
- la stima della velocità della corrente di marea nello stretto di Messina da dati tabellari;
- l'acquisizione dati sperimentali di velocità della corrente: rilievo di dettaglio delle velocità in un singolo punto di misura (Punta S. Raineri)
- i vincoli di installazione, in particolare limitazioni legate alla navigabilità, alla paesaggistica e all'ambiente.

Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO_2

E' unanime la consapevolezza che sarà impossibile sostituire, almeno per qualche decennio, quote significative di combustibili fossili con fonti alternative a basse o nulle emissioni di CO_2, e che quindi è sempre più necessaria l'adozione di soluzioni che limitino gli impatti conseguenti al loro utilizzo, e siano compatibili con gli obiettivi di contenere le alterazioni climatiche.

Queste considerazioni valgono in particolare per il carbone che è il principale combustibile impiegato a livello mondiale per la produzione di energia elettrica (genera circa il 30% dell'elettricità dell'UE, il 50% in USA, il 75% in Cina) e allo stesso tempo quello a maggiore intensità di carbonio.

Il ricorso al carbone per la generazione elettrica, necessario per soddisfare la domanda sempre maggiore di energia, è condizionato, oltre che dall'impiego di tecnologie pulite sempre più efficaci nella riduzione delle emissioni di macro e micro inquinanti, dall'introduzione di soluzioni in grado di abbattere radicalmente le emissioni di anidride carbonica. Da questo punto di vista, occorre puntare da un lato al miglioramento delle efficienze energetiche, legate all'innovazione dei cicli termodinamici e all'utilizzo di materiali innovativi, dall'altro allo sviluppo e dimostrazione di tecnologie di cattura e confinamento della CO_2 (tecnologie CCS).

L'utilizzo di tecnologie CCS può ridurre dell'80-90% le emissioni di CO_2 causate dagli impianti di potenza, a scapito di una efficienza energetica inferiore di circa 8-12 punti percentuali.

Molte delle tecnologie CCS sono già disponibili (ad esempio la produzione di ossigeno, i reattori di shift, i processi di estrazione di gas acidi da miscele di gas) ma hanno bisogno di essere integrate opportunamente con l'impiantistica di produzione per minimizzare le perdite energetiche ed i costi aggiuntivi ad esse associate.

Il progetto ha come finalità lo sviluppo, il test e la dimostrazione di un ventaglio di tecnologie innovative per l'impiego del carbone sia per la produzione di elettricità, con ridotte emissioni di gas serra, sia per la produzione di combustibili liquidi o gassosi, e che prevedano contestualmente la separazione della CO_2 e il suo stoccaggio. Il Progetto comprende sia attività di nuova impostazione sia attività a prosecuzione e completamento di quelle sviluppate nelle precedenti annualità.

L'approccio è duplice: da una parte sperimentare soluzioni tecnologiche più mature, con orizzonte applicativo nel breve-medio termine, con il valore aggiunto costituito dall'essere indirizzate allo sfruttamento del carbone e del sito del Sulcis in Sardegna; dall'altra puntare l'attenzione su tecnologie molto avanzate che consentano, anche se più a lungo termine, di ottenere soluzioni tecnologiche CCS (Carbon Capture and Storage) caratterizzate da prestazioni energetiche ed ambientali migliori delle attuali.

Per quanto riguarda la prima soluzione, nel sito del Sulcis sono già in corso attività di ricerca sul tema e specificamente relative allo sfruttamento eco-sostenibile di combustibili sporchi (carbone ad alto contenuto di zolfo, rifiuti, ecc.), a cui collaborano oltre alla Regione e l'ENEA anche le Società Sotacarbo e Carbosulcis, titolare quest'ultima della miniera di carbone omonima. Il sito, possibile sede di sperimentazione della separazione della CO_2 prodotta, è anche prossimo a siti adatti ad un eventuale sequestro della CO_2 in giacimenti acquiferi salini profondi presenti al di sotto degli strati carboniferi del bacino del Sulcis. Considerata questa opportunità, il progetto ha tra i suoi obiettivi finali lo studio di fattibilità di una piattaforma pilota che, partendo dalla gassificazione del carbone estratto dalle locali miniere del Sulcis ed il suo successivo trattamento, produca un syngas da utilizzare o per la produzione di idrogeno o per la produzione di combustibili liquidi, con il conseguente sequestro geologico della CO_2 nelle vicinanze della piattaforma stessa.

Per quanto riguarda invece la seconda soluzione, essa si basa sull'utilizzo di processi CCS nettamente più efficienti di quelli oggi tecnologicamente maturi. Le configurazioni di impianto oggi realizzabili infatti presuppongono l'applicazione, agli impianti di produzione di energia, delle tecnologie già utilizzate nell'industria chimica di separazione della CO_2 o di desolforazione o di produzione di idrogeno, e presentano penalizzazioni energetiche, e quindi anche economiche, molto elevate, dell'ordine di 8-10 punti percentuali di rendimento.

Nel settore della ricerca sulle tecnologie CCS più avanzate l'ENEA è da molti anni fortemente impegnato in tutte e tre le filiere tecnologiche (pre, oxy e post-combustion).

Tali attività di ricerca hanno portato alla progettazione ed alla realizzazione, presso il centro della Casaccia, di una infrastruttura sperimentale molto innovativa, denominata Piattaforma Zecomix, che, assieme a quella realizzata

presso la Sotacarbo in Sardegna, è stata presentata ed approvata per l'inserimento nella roadmap italiana delle infrastrutture di ricerca (IR) di interesse pan-europeo.

Le attività del progetto quindi effettuate presso i laboratori e presso le piattaforme sperimentali costituenti le due importanti IR italiane:

- l'infrastruttura Sotacarbo, finalizzata allo studio delle migliori tecnologie, nel breve e medio termine, in un dimostrativo che realizzi sia la produzione di combustibili liquidi e gassosi sia il sequestro geologico della CO_2;
- la Piattaforma Zecomix, finalizzata allo studio di processi più innovativi di decarbonatazione e trattamento gas, in linea con le più avanzate ricerche internazionali.

In tal modo si perseguirà nel contempo anche l'obiettivo di valorizzare le due infrastrutture sopradette e favorire quindi una più ampia, autorevole e qualificata partecipazione del sistema italiano impresa/ricerca ai grandi programmi ed iniziative europee ed internazionali quali FP7, Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), European Energy Research Alliance (EERA) e Electrical Safety Foundation International (ESFRI).

Contestualmente, il progetto intende continuare l'azione di supporto al Ministero dello Sviluppo Economico, già operata anche nelle precedenti annualità, finalizzata al coordinamento e all'integrazione di diversi progetti condotti in Italia nell'ambito di programmi differenziati e variamente finanziati, tenendo conto delle priorità dettate dalle scelte strategiche governative.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale del progetto è favorire lo sviluppo di tecnologie avanzate per un utilizzo pulito dei combustibili fossili e del carbone in particolare, supportando la realizzazione di impianti dimostrativi e permettendo di risolvere le principali problematiche legate alla penalizzazione, in termini di costo e di rendimento, che l'attuale stato delle tecnologie CCS implica.

L'attività, che costituisce la prosecuzione logica dei programmi del precedente biennio, si articola, secondo le seguenti linee:

LINEA DI ATTIVITÀ A: Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone

Tale linea ha tre obiettivi principali:

A.1 *La definizione e la messa a punto delle tecnologie migliori per produrre un syngas idoneo, sia come composizione che come pulizia, per i successivi processi di trasformazione in combustibili liquidi o gassosi*. Gli aspetti di innovazione risiedono nella possibilità di ricorrere a configurazioni impiantistiche che consentano, oltre che di ottenere un elevato rendimento energetico (sistemi altamente integrati ed a elevata temperatura), anche l'utilizzo di carboni di basso pregio (ad alto contenuto di zolfo e di tar) eventualmente miscelati con altri tipi di carbone e/o biomasse (co-gassificazione).

A.2 *La messa a punto di una innovativa tecnologia di gassificazione basata su pirolisi,* applicata a tipologie di carbone di difficile utilizzo a causa dell'elevato contenuto di tar e zolfo, al fine di mettere a punto un processo innovativo di pre-trattamento e produzione di syngas pulito, di qualità migliore rispetto ai tradizionali processi di gassificazione, e di char a basso contenuto di zolfo.

A.3 *Lo studio ed ottimizzazione dei processi CTL (Coal To Liquid).* I processi cosiddetti CTL provvedono alla produzione di combustibili liquidi a partire dal carbone con la rimozione di parte del contenuto carbonioso o con l'aumento del tenore di idrogeno effettuata in maniera diretta o indiretta.

LINEA DI ATTIVITÀ B: Aumento dell'efficienza delle tecnologie di cattura della CO_2 con produzione di elettricità "zero emission"

Le attività sono di carattere prevalentemente sperimentale su impianti a scala sia di laboratorio che pilota, su tecnologie molto innovative di cattura della CO_2. Queste attività rappresentano uno sviluppo successivo (su impianti di scala maggiore) di quelle portate a compimento nelle prime annualità della Ricerca di Sistema Elettrico.

In particolare sono previste le seguenti attività:

B.1 *Sviluppo di tecnologie pre-combustion.* l'obiettivo riguarda lo studio di un processo di cattura multi-ciclica della CO_2 ad alta temperatura da correnti gassose attraverso sorbenti solidi. A tal fine viene caratterizzato un sorbente altamente rigenerabile a base di CaO disperso su una matrice di alluminato di calcio; inoltre viene

portato avanti l'adattamento e messa a punto dell'impianto sperimentale Zecomix (scala pilota) per prove di assorbimento della CO_2 e dell'H_2S dal syngas prodotto mediante un gassificatore di carbone a letto fluido ad ossigeno. L'obiettivo è quello di selezionare un sorbente che, grazie all'aggiunta di opportuni additivi, possa superare i 50 cicli di rigenerazione con una perdita di capacità inferiore al 20%.

B.2 *Sviluppo di tecnologie post-combustion.* L'obiettivo consiste nell'acquisizione di dati e competenze sul processo di cattura della CO_2 con solventi liquidi. L'attività sperimentale viene condotta sia su syngas prodotti in impianti di gassificazione, sia su effluenti gassosi provenienti dalla combustione del polverini di carbone, in relazione alla Piattaforma Pilota Sotacarbo, e ad attività in laboratorio ENEA condotte su un syngas e fumi simulati artificialmente. In particolare viene curata ottimizzazione di processi al fine di aumentare il rendimento e ridurre i costi di separazione della CO_2 e studi su nuove tipologie di solventi.

B.3 *Sviluppo di bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno*. Realizzazione e test di un nuovo bruciatore per turbogas, di tecnologia Trapped Vortex, in grado di realizzare una la combustione in assenza di fronte di fiamma (tecnologia MILD), stabile, efficiente, e a basse emissioni, particolarmente indicata per la combustione di syngas ricchi di idrogeno provenienti da impianti con cattura della CO_2, operanti in modalità "pre-combustion".

B.4 *Messa a punto di tecnologie numeriche per l'ottimizzazione del processo di ossicombustione.* Messa a punto di modelli per la simulazione della combustione in ossigeno del polverino di carbone, in condizioni sia pressurizzate (combustione di una miscela trifase) che in condizioni atmosferiche.

***LINEA DI ATTIVITÀ C*: Tecnologie di sequestro e utilizzo della CO_2 e progettazione di un impianto dimostrativo completo che preveda la cattura ed il sequestro della CO_2 in sito idoneo**

Le attività della presente linea si articolano nei seguenti obiettivi:

C.1 *Studi sulle tecnologie di sintesi di combustibili gassosi dalla CO_2.* L'obiettivo riguarda studi sperimentali relativi alla sintesi di combustibili gassosi da CO_2 e lo studio cinetico e termodinamico della reazione di metanazione. A conclusione dell'indagine cinetico-termodinamica, tesa a valutare l'effetto dei vari parametri sperimentali (pressione, temperatura, ecc.) sulla reazione, e quello dell'avvelenamento del catalizzatore ad opera di composti solforati (H_2S ed SO_2), viene allestito un piccolo impianto dimostrativo, su scala laboratorio, che realizzi, con continuità, la reazione con accumulo del metano prodotto.

C.2 *Studi su tecnologie di fissaggio della CO_2 con metodi chimici*. L'obiettivo riguarda lo studio della termodinamica e cinetica del processo di carbonatazione di ceneri (fly-ash) e rifiuti industriali alcalini, per l'efficientamento del processo stesso.

C.3 *Attività progettuale per l'ottimizzazione di un impianto dimostrativo che preveda la cattura ed il sequestro della CO_2 in sito idoneo.* L'obiettivo prevede l'approfondimento degli aspetti di cattura, trasporto e storage con particolare riferimento all'ottimizzazione e successiva sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimica nel bacino del Sulcis.

LINEA DI ATTIVITÀ D: Partecipazione a organismi nazionali e internazionali

L'attività prevede azioni specifiche di supporto ai Ministeri competenti, attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali. Attraverso quest'attività, è assicurato il contributo a numerose iniziative a livello internazionale volte ad intensificare la collaborazione fra i diversi Paesi per lo sviluppo e dimostrazione delle tecnologie CCS e CCT. Ci si riferisce in particolare alla partecipazione al Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF), alla piattaforma europea sugli impianti alimentati a combustibili fossili a emissioni zero (ZEP), ai gruppi di lavoro dell'Implementing Agreement della IEA "Clean Coal Center" e all'European Energy Research Alliance (EERA) nell'ambito del Joint Program sulle CCS.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Produzione e trattamento combustibili gassosi e liquidi da carbone

A.1 Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

E' proseguita l'attività di sperimentazione, svolta presso il Centro di Ricerche ENEA di Casaccia, dove è ubicato il mini impianto gassificatore updraft (Impianto GEneratore Sperimentale di SYngas da CArbone - GESSYCA) dotato di sensoristica industriale e di un sistema di acquisizione e controllo capace di operare, sia in maniera automatica che manuale, sui principali parametri di processo, con l'ausilio di un sistema di analisi gas che effettua il

monitoraggio in continuo del gas di sintesi. 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 innovativa atta al controllo del processo. Le attività si sono sviluppate focalizzando l'attenzione sulla qualità del syngas prodotto e sul definire le modalità di conduzione dell'impianto, attraverso l'utilizzo di strumentazione e analitica di supporto al controllo di impianto. Nel particolare l'attività si è posta come obiettivo lo studio della reattività di un carbone alto volatile con differenti tipologie di miscele di agenti gassificanti. A titolo di esempio si riporta l'andamento delle concentrazioni dei principali composti del syngas (Figura 179).

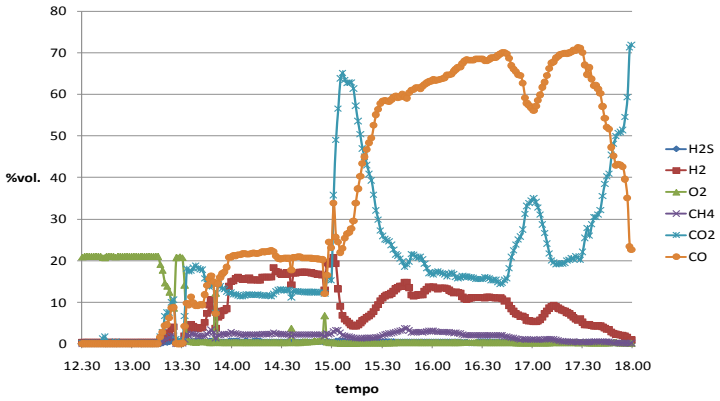


Figura 179. Andamento della composizione del syngas durante un test sperimentale

È stato quindi progettato e realizzato l'upgrade dell'impianto GESSYCA (Figura 180) in grado di esercire e monitorare il processo di gassificazione, la depurazione del syngas e il suo smaltimento in torcia. In particolare si progettato un nuovo reattore di gassificazione, prevedendo l'inserimento di un refrattario interno e migliorando il sistema di scarico ceneri e quello di alimentazione del carbone in modo da poter funzionare in continuo a temperature più elevate. La progettazione si è sviluppata, testando differenti metodologie di gassificazione basate sull'utilizzo di diverse geometrie interne.

Figura 180. Lavori di realizzazione del nuovo impianto GESSICA

Sono proseguite parallelamente le attività di coordinamento e collaborazione alla sperimentazione presso gli impianti della Piattaforma Pilota Sotacarbo. In particolare, nel corso dell'attività di monitoraggio del processo di gassificazione si è stata migliorata la mappatura termica del processo in svolgimento all'interno del gassificatore, inserendo di una serie di punti di misura basati su termocoppie di tipo K disposte a 120° su tre direttrici della parte cilindrica.

A titolo di esempio in Figura 181 si riportano tre mappature relative alle fasi di avviamento, ad una fase di regime pressoché stazionario ed ad una di incipiente spegnimento.

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.

L'obiettivo è quello di poter efficacemente monitorare il processo ed effettuare con cognizioni di causa le operazioni di carico del carbone, di scarico delle ceneri, di modulazione dei reagenti gassosi e di movimentazione dello stirrer omogeneizzatore in modo da pervenire ad un funzionamento stabile ed efficiente in linea con le richieste di gas necessarie all'utenza finale (produzione elettrica o di idrogeno/syngas).

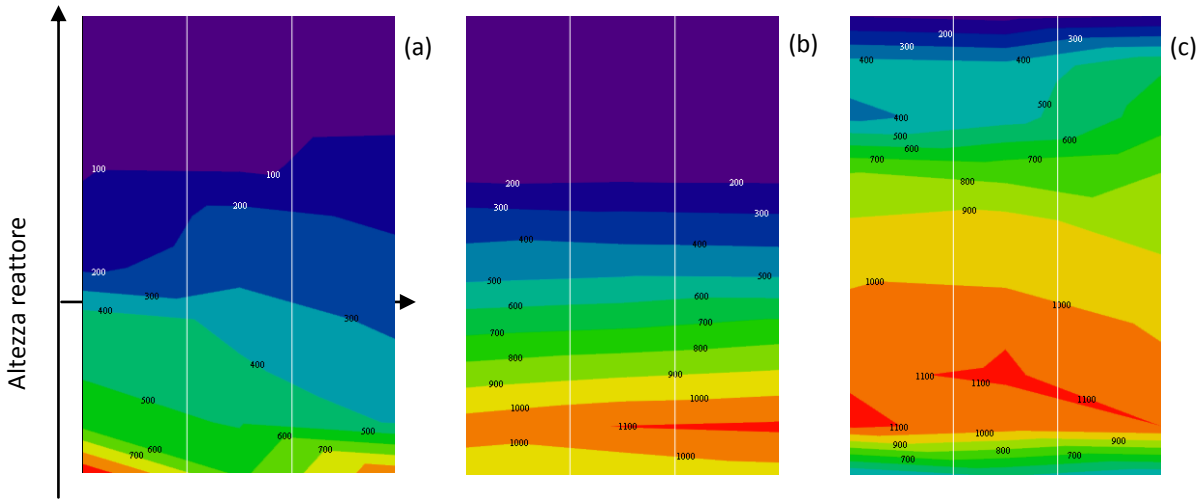


Figura 181. Mappatura termica della parete interna del reattore (sviluppo) fasi di avviamento (a), stazionario (b), pre-spegnimento (c)

Le attività, sia teoriche che sperimentali, condotte da SOTACARBO SpA, in collaborazione con ENEA relative alla ottimizzazione del processo di gassificazione (produzione, trattamento e conversione del syngas prodotto) hanno riguardato:

- modifiche e migliorie di impianto
- acquisizione nuovo sistema di analisi syngas
- caratterizzazione sistemi di campionamento e misura syngas
- sperimentazione gassificazione e co-gassificazione
- sperimentazione sistemi di pulizia e trattamento gas
- produzione di energia elettrica e idrogeno
- cattura della CO_2
- rigenerazione dei solventi

In particolare sono stati emessi gli ordini per le modifiche e le integrazioni di impianto.

Sono stati eseguiti test preliminari per verificare la funzionalità dei sistemi costituenti l'impianto, a seguito delle modifiche e integrazioni effettuate. Successivamente sono state avviate le sperimentazioni relative a:

- processi di gassificazione, dove è stata valutata l'efficienza del processo al variare della granulometria del combustibile utilizzato (carbone sudafricano, Alaska);
- processi di co-gassificazione con utilizzo di biomasse e carbone sud africano;
- processi di pulizia gas con l'impiego del sistema di depolverazione elettrostatica (WESP);
- processi di produzione di energia elettrica mediante un motore a combustione interna;
- processi di cattura della CO_2 presente nel syngas e fumi da carbone (simulati tramite gas in bombole) con l'utilizzo di solventi a base di ammine;
- processi di rigenerazione dei solventi a base di ammine utilizzati nel processo di cattura della CO_2.

Di seguito è riportata una descrizione più di dettaglio delle attività svolte [Report RdS/2012/175-182-220-221-222 e 223].

In particolare, sono stati eseguiti sull'impianto pilota i test per valutare l'efficienza del processo di gassificazione utilizzando un carbone sub bituminoso (Usibelli) proveniente dall'Alaska a granulometria controllata (8-12 mm), il grado di conversione e la reattività del combustibile, e confrontarlo con quanto ottenuto nelle precedenti prove di gassificazione effettuate con carboni differenti (Sud Africano e Sulcis). I componenti d'impianto testati sono stati il Gassificatore, lo Scrubber, il 1° Stadio di desolforazione a freddo con soda e torcia.

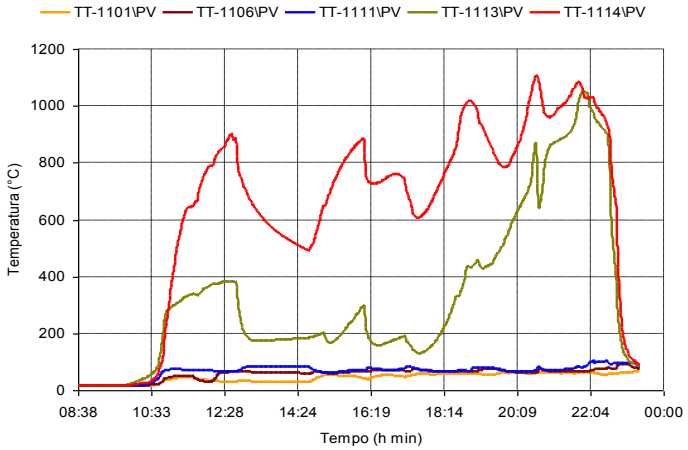


Figura 182. Andamento delle temperature all'interno del gassificatore in funzione del tempo

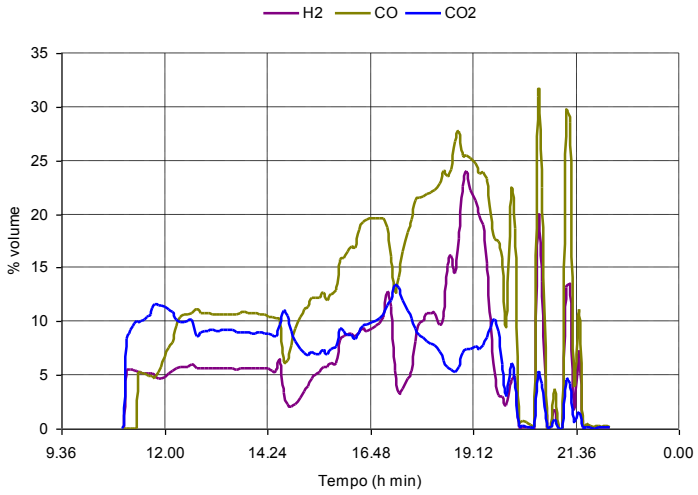


Figura 183. Composizione syngas

Sul tema dell'ottimizzazione del processo di gassificazione, l'Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche – ha condotto una significativa attività finalizzata alla sintesi e sperimentazione di materiali innovativi per il trattamento (pulizia) del syngas da carbone.

Uno degli ostacoli maggiori allo sviluppo su scala commerciale della tecnologia di gassificazione del carbone, come tecnologia "clean coal", è rappresentato dall'esigenza della rimozione profonda, dal gas di sintesi, dei contaminanti presenti quali l'idrogeno solforato. La presenza, nel syngas grezzo, dei composti solforati è problematica principalmente per due ragioni: da un lato, utilizzando tale gas come combustibile, i suddetti composti darebbero luogo alla formazione di ossidi di zolfo, irritanti e nocivi per l'organismo umano e causa dell'ormai noto fenomeno delle "piogge acide"; d'altra parte i composti dello zolfo sono generalmente mal tollerati dalle apparecchiature attraversate dal syngas, che possono essere negativamente condizionate in termini di funzionamento e durata nel tempo.

La rimozione dell'idrogeno solforato, inquinante contenuto in misura significativa nel syngas, la cui emissione è strettamente regolamentata, è stata studiata su sorbenti solidi di nuova concezione. Il loro impiego rappresenta una potenziale alternativa ai tradizionali processi per via secca e per via umida (ammine), inefficienti dal punto di vista energetico e a impatto ambientale significativo. La tecnologia della desolforazione a media-alta temperatura è ancora relativamente recente ed i risultati ottenuti dipendono in larga misura dai sorbenti utilizzati, per cui la ricerca si è indirizzata verso lo studio di materiali che siano capaci di ridurre la concentrazione di H_2S a livelli sufficientemente bassi (minori di 200 ppm) e, contemporaneamente capaci di resistere a cicli ripetuti di desolforazione e rigenerazione. Lo studio dei sorbenti per la desolforazione del syngas è portato avanti da oltre venti anni da numerosi gruppi di ricerca, nonostante ciò i meccanismi coinvolti sono ancora piuttosto dibattuti. La scelta del sorbente principalmente si basa su due fattori:

1. Origine del gas da sottoporre a desolforazione;

2. Intervallo di temperatura alla quale si svolge la reazione.

Per quanto riguarda le condizioni di temperatura alla quale si svolge la reazione, esistono due approcci differenti: il primo ritiene che la desolforazione a temperatura elevate (fra 500 e 700 °C) sia più efficiente e studia sorbenti per questo intervallo, mentre l'altro predilige temperature di processo più moderate (300-550 °C). Nel lavoro si è considerato l'intervallo 300-400 °C, quindi temperature di desolforazione più moderate, selezionando poi sia quei sorbenti che dimostrano il miglior comportamento proprio nel nostro range di interesse, sia alcuni fra quelli generalmente indicati per temperature maggiori ma che potrebbero risultare efficaci anche nel nostro caso. Gli ossidi metallici sono i principali candidati per la rimozione dello zolfo dal syngas, data la loro affinità con l'H_2S e la capacità di formare solfuri stabili, e costituiscono l'elemento attivo dei sorbenti solidi. Durante il processo di desolforazione, in condizioni riducenti, questi solidi reagiscono, con una reazione di tipo gas-solido, con l'H_2S e gli ossidi si convertono in solfuri metallici. L'interesse commerciale verso i sorbenti, è determinato non solo dal comportamento in termini di capacità di rimozione del gas, ma anche dalla loro rigenerabilità e durata attraverso diversi cicli di solforazione/rigenerazione. Le caratteristiche da considerare per valutare i sorbenti per la desolforazione sono:

1. elevata velocità di adsorbimento e concentrazione di equilibrio dell'H_2S nella fase gassosa;
2. facilità di rigenerazione del solfuro che si forma durante la reazione gas-solido;
3. limitata riduzione dell'ossido metallico alla specie elementare;
4. buona durabilità meccanica del solido che renda possibili ripetuti cicli di desolforazione/rigenerazione.

Il primo e più importante criterio per la scelta del sorbente più adatto dovrebbe essere basato su considerazioni termodinamiche, al fine di limitare la scelta a quei composti che sono capaci di ridurre la concentrazione di equilibrio di H_2S al livello desiderato, alle condizioni di temperatura e pressione stabilite. Per questa ragione sono stati considerati alcuni studi condotti sulla termodinamica degli ossidi metallici. Il lavoro più importante in questo campo è stato svolto più di 25 anni fa da Westmoreland e Harrison, che hanno selezionato 28 ossidi metallici per la desolforazione ad alta temperatura, in base alle sole considerazioni termodinamiche. A conclusione di questo studio, l'ossido di zinco è considerato tra i migliori candidati, su basi termodinamiche, per la rimozione di H_2S e lo studio è proseguito per trovare formulazioni e tecniche di preparazione che ne limitassero la tendenza alla riduzione e la conseguente volatilizzazione con perdita di materiale. L'equilibrio termodinamico per la desolforazione del ZnO è molto favorevole, permettendo di raggiungere concentrazioni finali di H_2S di pochi ppm, ma la cinetica della reazione è più lenta rispetto a quella ad esempio dell'ossido di ferro (che fu il primo sorbente rigenerabile studiato).

Negli anni passati, infatti, diversi studi sono stati svolti con particolare attenzione sull'uso, nella desolforazione a caldo di correnti gassose, di ossidi metallici a temperature al di sopra di 600 °C, in relazione al fatto che il trattamento ad alte temperature apporta un beneficio in termini di efficienza termica del ciclo globale. Tuttavia pochi ossidi metallici sono capaci di ridurre al di sotto dei limiti richiesti il contenuto di H_2S nel fuel gas, quando si operi in condizioni di alta temperatura per lunghi periodi di tempo. Recentemente si è volta l'attenzione verso temperature inferiori, poiché si è dimostrato che le perdite in efficienza termica incontrate riducendo la temperatura operativa nel range 350-550 °C, sono relativamente piccole. Aumentando il possibile intervallo termico di lavoro, si può, di conseguenza, effettuare una scelta più ampia tra un maggiore numero di sorbenti. Le caratteristiche di alcuni ossidi metallici usati per la desolforazione di gas caldi sono riportate in Tabella 37.

Tabella 37. Caratteristiche dei più comuni ossidi metallici usati come sorbenti

Materiale sorbente	T sulfurazione [°C]	T rigenerazione [°C]	Sorbente utilizzato [%]	H_2S in uscita [ppmv]
ossido di ferro	360-500	500-650	25-45	<100
ossido di zinco	480-540	500-700	50-70	<1
ossido di stagno	380-500	450-500	85	<100
zinco ferrite	450-600	600	20-80	<20
zinco titanato	450-750	600-750	40-60	<10
ossido di cerio	750-1000	600	90	<100

Considerando le condizioni sperimentali di solforazione e rigenerazione in termini di temperatura usate durante i test, l'ossido di ferro pare essere un ottimo candidato per questo tipo di applicazioni, in virtù anche della sua economicità e larga disponibilità. Infatti i sorbenti a base di ossidi di ferro richiedono temperature di solforazione e di rigenerazione generalmente più basse rispetto a molti altri ossidi metallici. Esso possiede altresì un'elevata reattività a alta capacità di rimozione nei confronti dell'H_2S. L'analisi termodinamica rivela inoltre che i sorbenti a

base di ossido di ferro possono dare come prodotto di una parziale ossidazione durante la rigenerazione, zolfo elementare. Comunque l'ossido di ferro può trovarsi sotto diverse forme come Fe_2O_3, Fe_3O_4 e FeO dipendenti da fattori come temperatura e pressione parziale di CO e H_2, e generalmente tende ad essere ridotto ad alta temperatura. Questo suggerisce la possibilità di estendere la ricerca allo studio sia delle performance che di rigenerabilità di altri sistemi, costituiti sempre da ossidi a basso costo (Fe_2O_3, $ZnFe_2O_4$, etc), che mostrano cinetiche di reazioni più veloci.

Generalmente, le fasi di ossido puro usate come sorbenti, se trattate ad alta temperatura, hanno la tendenza a sinterizzare, con conseguente diminuzione dell'area superficiale e delle prestazioni desolforanti. Per tale motivo, ed in base ai risultati ottenuti nei nostri precedenti lavori condotti nel 2010 e nel 2011 (Report RdS/2010/23 e Report RdS/2011/238), si è pensato di confinare la fase attiva scelta su un supporto mesostrutturato. I materiali mesostrutturati, caratterizzati da un sistema mesoporoso regolare, forniscono spesso prestazioni superiori rispetto ai materiali mesoporosi convenzionali, soprattutto quando usati come supporti. Il materiale denominato SBA-15 è una silice amorfa con un sistema bidimensionale di pori cilindrici ordinati con simmetria esagonale. È caratterizzato da una distribuzione stretta del diametro dei pori, modulabile in un ampio intervallo (2-30 nm) al variare delle condizioni di sintesi, da una elevata area superficiale (fino a 1000 m^2/g) e da una notevole stabilità chimica e termica. Tali caratteristiche rendono l'SBA-15 particolarmente adatta ad essere utilizzata come supporto nel quale confinare le diverse fasi attive in forma nanocristallina, quindi potenzialmente molto reattiva, superando in questo modo anche le severe limitazioni diffusionali tipiche di solidi microporosi quali zeoliti e pillared clays. Poiché l'SBA-15 è un materiale caratterizzato da un elevato volume poroso, l'impregnazione si è rivelato un metodo adatto per applicazioni in cui il precursore della fase attiva deve essere disperso all'interno dei canali mesoporosi. Il lavoro di ricerca condotto presso il DSCG-UniCA ha dunque riguardato lo sviluppo di sistemi sorbenti per la desolforazione profonda a media-alta temperatura del syngas proseguendo con il progetto avviato nel 2010 (Report RdS/2010/23), studiando materiali innovativi in alternativa ai sistemi a base di ossido di zinco. A tal fine si è optato per il confinamento dell'ossido di ferro (per le ragioni succitate) confinato all'interno di una matrice mesostrutturata quale l'SBA-15 e focalizzando l'attenzione su un particolare metodo di sintesi e di caricamento di fase attiva.

Inoltre sono stati preparati sistemi e materiali prima in forma di polvere, per poi passare ad una scala dimensionale superiore (dell'ordine dei millimetri), pellettizzando in geometrie standardizzate i compositi ZnO/SBA-15 (la cui preparazione è riportata nella precedente attività di ricerca ("Studio e sviluppo di processi e materiali innovativi per il trattamento del syngas dal carbone", Report RdS/2010/23), al fine di testare i sorbenti in dimensioni tali da precorrere l'utilizzo su scala industriale. È stato inoltre prodotto e messo a disposizione di ENEA un quantitativo significativo di materiale sorbente pellettizzato.

Altro aspetto fondamentale, connesso al processo di gassificazione, è la produzione del tar. Come è noto negli impianti di gassificazione di biomassa e di carbone il tar rappresenta un grosso problema perché deve essere eliminato dal syngas pur possedendo gran parte del potere calorifico del combustibile di partenza. Per questo motivo è interessante sviluppare un processo che renda il suo recupero vantaggioso.

A tal fine è stata attivata una collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza" relativa alla "Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo di abbattimento del tar" [Report RdS/2012/177].

Nell'ambito di tale collaborazione è stato realizzato un metodo di abbattimento del tar volto al suo recupero: il cracking autotermico dei gas di pirolisi. E' stata avviata una campagna di sperimentazioni su un impianto di gassificazione di scala di laboratorio. L'impianto è costituito da un reattore di gassificazione di tipo up-draft seguito da un reattore di cracking catalitico a base di allumina (Figura 184). Poiché le reazioni di cracking sono endotermiche, è necessario fornire energia al sistema dall'esterno. Il secondo reattore è quindi riscaldato da una resistenza elettrica esterna. Per aumentare il vantaggio economico ed energetico che deriva dal recupero del tar, si è cercato di rendere il secondo stadio del processo autotermico, effettuando un'ossidazione parziale del gas di sintesi e del tar prodotti nella gassificazione.

Sono state condotte diverse prove sperimentali che hanno evidenziato la difficoltà di raggiungere all'interno del reattore di cracking la temperatura di innesco della miscela gassosa in uscita dal gassificatore. La temperatura di innesco del gas, che è stata misurata pari a 410 °C, è stata raggiunta mantenendo la temperatura della resistenza esterna a 800 °C.

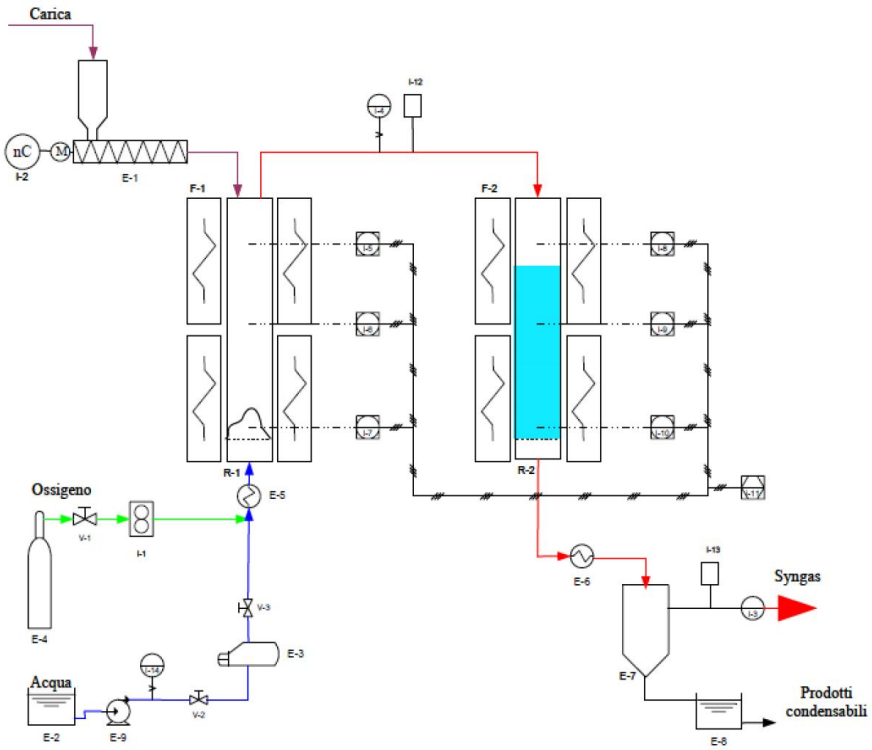


Figura 184. Schema dell'impianto di gassificazione

Le difficoltà sono dovute al fatto che il gas esce troppo freddo (450 °C) dal reattore di gassificazione ed incontra l'aria, che entra anch'essa fredda, ad una temperatura troppo bassa per permettere l'avvio della reazione. Dal grafico in Figura 185 si nota come il gas si raffredda di 100 °C quando viene a contatto con l'aria, nel caso riportato l'aria è inviata al dodicesimo minuto.

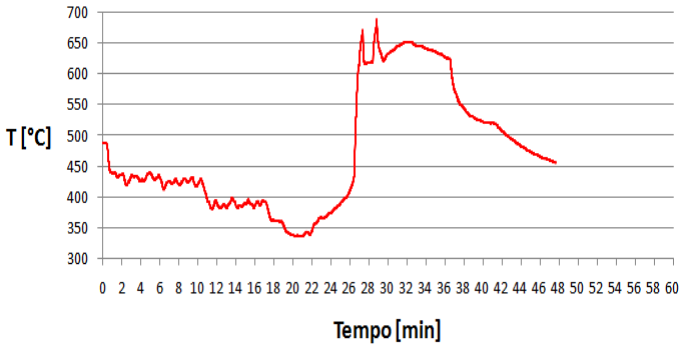


Figura 185. Temperatura misurata all'ingresso del setto poroso presente nel secondo reattore

I risultati ottenuti sono incoraggianti: si ottiene infatti una riduzione drastica del tar ed il gas in uscita dal reattore di cracking contiene ancora un'elevata concentrazione di CO e CH_4 dopo aver subito l'ossidazione parziale, come riportato in Tabella 38.

Tabella 38. Concentrazione dei gas in uscita dal secondo reattore

Prodotti di pirolisi e reforming	Concentrazione %v/v prova 3	Concentrazione %v/v prova 5
CO	20,82	24,17
CO_2	13,60	15,47
CH_4	11,52	10,96

A.2 Studi e test su processi avanzati di gassificazione/pirolisi e pulizia syngas integrati, per l'utilizzo di carboni ad alto contenuto di tar e zolfo

L'ENEA, nell'ambito del Progetto sta sviluppando una serie di attività sperimentali per lo studio dei fenomeni di pirolisi, gassificazione e clean-up del gas di sintesi, legate alla produzione di idrogeno da carbone ed alle tecnologie CCS.

Lo sviluppo delle tecnologie per l'utilizzo pulito del carbone, ed in particolar modo di carboni di basso rango come quello del Sulcis, è infatti limitato dalla presenza nel syngas di idrocarburi che condensano a bassa temperatura (tar), ed hanno un effetto estremamente dannoso sulle apparecchiature ed i condotti su cui si depositano.

Essendo la pirolisi un processo termico in grado di convertire una carica di bassa qualità in un syngas di elevata qualità, si è intrapreso uno studio con il fine di valutare se è possibile, attraverso questo processo, ottenere un char di migliore qualità per i processi di gassificazione, la separazione del tar ed in alternativa la sua successiva valorizzazione termica o la messa a punto di sistemi innovativi di abbattimento.

Obiettivo dell'attività è fornire le indicazioni teorico-sperimentali sullo sviluppo della devolatilizzazione/pirolisi del carbone in funzione delle condizioni operative di funzionamento, quali pezzatura del carbone, temperatura del forno, tempo di residenza del solido, ecc.

A tal proposito il Laboratorio UTTEI/COMSO del Centro Ricerche ENEA di Casaccia, ha intrapreso una collaborazione con l'altro Laboratorio UTTRI/RIF del Centro di Ricerche di Trisaia, che ha permesso di realizzare parte dell'attività di ricerca utilizzando le strutture impiantistiche (pirolizzatore a tamburo rotante da banco e pirolizzatore a tamburo rotante pilota) disponibili presso suddetta Unità.

- *Prove di laboratorio*

L'oggetto della prima attività di sperimentazione è stato quello di valutare il comportamento del carbone Sulcis in fase di pirolisi, con il fine di individuare le condizioni operative da utilizzare nella successiva sperimentazione sul reattore da banco, e di effettuare una prima valutazione dei prodotti di pirolisi sia gassosi che solidi.

La sperimentazione ha previsto un'iniziale caratterizzazione chimico-fisica del carbone

In particolare sono stati effettuati test (sia sul carbone Sulcis che sui campioni pirolizzati (analisi elementare, potere calorifico, analisi immediata, analisi TGA-DSC accoppiata a FT-IR) [Report RdS/2012/180].

Con apposite misure condotte in laboratorio, la reattività di gassificazione con CO_2 del residuo solido proveniente dalla pirolisi del carbone del Sulcis a 900 °C e in due diverse atmosfere (N_2 e H_2) è stata studiata nell'intervallo di temperatura 800-900 °C a pressione ambiente. La reattività di gassificazione del carbone Sulcis è influenzata dal tipo di atmosfera di pirolisi usata nell'ottenere i char, essendo l'energia di attivazione del charH2 minore del charN2. La produzione del gas CO è stata accompagnata da formazione di COS come impurezza per entrambi i char.

- *Prove sperimentali su impianto in scala "banco"*

Sulla base dei risultati ottenuti nella fase precedente è stata impostata la sperimentazione sull'impianto in scala "banco" (ENEA-Trisaia). Tale fase sperimentale, propedeutica a quella prevista sull'impianto pilota, consente di effettuare un numero consistente di prove in un tempo relativamente breve e con una sensibile riduzione dei costi di gestione rispetto alla sperimentazione da effettuare su impianto scala "pilota" (il rapporto sull'alimentazione è di circa 1:50).

È stata stabilita una matrice sperimentale costituita da 12 prove, facendo variare in modo opportuno i principali parametri di prova, quali temperatura, tempo di residenza, pezzatura del carbone.

Questa fase sperimentale è ancora in corso, tuttavia allo stato attuale sono state effettuate 4 prove i cui risultati, in corso di analisi, sono descritti nel Report RdS/2012/179.

- *Prove sperimentali su impianto scala "pilota"*

Lo studio dei risultati ottenuti dalla sperimentazione su impianto scala "banco" dovrà fornire un quadro esaustivo atto a pianificare una campagna sperimentale su impianto "pilota" (ENEA-Trisaia), che consente di processare una portata carbone più significativa, potendo stabilizzarsi su valori di alcuni kg/h.

La matrice sperimentale da eseguire su tale impianto verrà determinata sulla base dei risultati conclusivi ottenuti nelle campagne di prove effettuate sull'impianto da "banco", selezionando e fissando opportunamente i valori dei parametri di processo.

- *Sviluppo del processo integrato*

In parallelo alla sperimentazione sul processo di pirolisi è iniziato lo studio relativo alla progettazione di un impianto per la realizzazione di un sistema integrato di trattamento termico del carbone per la produzione di syngas ad alto contenuto di idrogeno. Si è in tal modo voluto anticipare i tempi rispetto alla validazione dell'intero processo, predisponendo la facility che sarà oggetto di sperimentazione nella prossima annualità.

L'impianto denominato VAL.CH.I.RI.A. (VALorizzazione CHar: Impianto RIcerche Avanzate) è stato realizzato nell'area sperimentale della Piattaforma ZECOMIX di Casaccia, potendo in tal modo avvalersi delle facility e degli ausiliari della suddetta Piattaforma.

Lo schema di processo proposto è predisposto in modo da separare nettamente la zona del reattore in cui avviene il rilascio della parte volatile da quella in cui avvengono le reazioni di gassificazione vera e propria. Tale separazione ha tre scopi:

1) Eliminare, o in ogni caso diminuire, l'influenza che la presenza delle sostanze volatili ha sulle reazioni di gassificazione/combustione del carbone. E' infatti generalmente riconosciuto che le principali differenze di comportamento termico e di reattività tra carboni sono prevalentemente riconducibili alle differenze di comportamento nello stadio di devolatilizzazione. Le modalità con cui avviene la devolatilizzazione influenzano fortemente anche la reattività del char, dato che le reazioni di combustione procedono sui siti attivi del char su cui è presente idrogeno residuo. Questa serie di problematiche vengono a mancare se le reazioni di combustione/gassificazione avvengono sul char residuo in un volume non interessato dalla parte volatile.
2) Sfruttare il potere calorifico delle sostanze volatili per effettuare il cracking termico del tar ad elevata temperatura, mediante la combustione con aria (o con ossigeno) delle sostanze volatili stesse, con eventuale presenza di catalizzatore.
3) Utilizzare il contenuto termico dei fumi di combustione delle sostanze volatili per gassificare il char residuo.

Lo schema di principio del processo proposto è riportato in Figura 186.

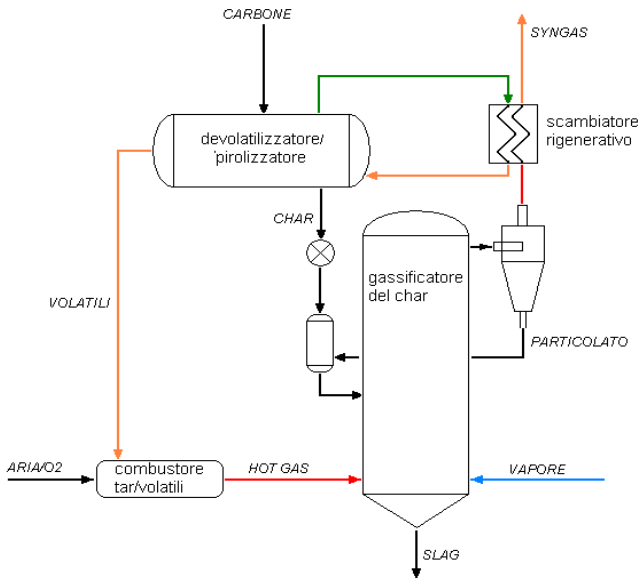


Figura 186. Schema di principio dell'impianto VAL.CH.I.RI.A.

Nello schema si individuano i seguenti componenti principali:

- un reattore di devolatilizzazione/pirolisi, funzionante in assenza di ossigeno in un range di temperatura compreso tra i 400 e i 600 °C, nel quale si realizza la liberazione dei volatili e la pirolisi del carbone, con formazione da una parte di un gas contenente H_2, CO, H_2O, CO_2 e tar, dall'altra il residuo solido composto principalmente da carbonio (char). Tale reattore è alimentato termicamente dal syngas caldo proveniente dal gassificatore del char, mediante uno scambiatore rigenerativo posto sul ricircolo di una opportuna frazione dei volatili stessi;

- un reattore di gassificazione del char, formatosi nel pirolizzatore, alimentato mediante la combustione parziale del gas pirolitico; la temperatura di funzionamento di tale reattore deve attestarsi attorno agli 850 °C per consentire una sufficiente efficienza di gassificazione. Il controllo della temperatura è ovviamente realizzato mediante la regolazione opportuna del rapporto stechiometrico della combustione dei volatili;
- il processo è completato, al fine di ottimizzarne le prestazioni, con un ulteriore scambiatore rigenerativo per preriscaldare l'aria di combustione dei volatili a spese del calore sensibile del syngas in uscita.

Il progetto dell'impianto VALCHIRIA è descritto nel Report RdS/2012/178.

A.3 Analisi del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone (Coal To Liquid)

Nell'ambito dell'obiettivo è stato condotto da ENEA uno studio relativo alla modellizzazione ed analisi di fattibilità tecnico economica di un impianto coal to liquid, integrato con tecnologie CCS [Report RdS/2012/181].

L'analisi di sistema è stata sviluppata con l'ausilio del codice di simulazione impiantistica Aspen Plus.

Si è analizzato un impianto di tipo dimostrativo collegato alle potenzialità della miniera del Sulcis e si è stimata una taglia impiantistica di circa 9000 barili/giorno di combustibili liquidi prodotti equivalenti ad un consumo di circa 4500 t/giorno di carbone. La valutazione della configurazione impiantistica si è sviluppata attraverso l'integrazione delle differenti sezioni al fine di ottimizzare gli scambi energetici. Si sono quindi stimate le prestazioni in termini di bilanci in massa ed energia di due tipologie di impianti senza CCS e con CCS (Figura 187), con l'obiettivo di analizzare l'impatto sull'efficienze dell'inserimento della cattura della CO_2.

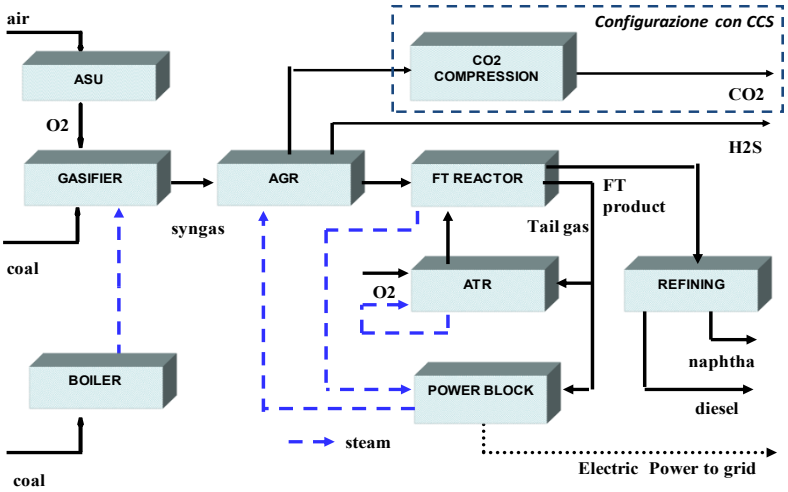


Figura 187. Schema a blocchi dell'impianto CTL analizzato

I risultati indicano che più del 47% dell'input energetico viene convertito in energia elettrica e prodotti liquidi con una differenza di due punti percentuali tra i due casi, ed un resa in combustibili liquidi del 40 %. (Figura 188). Relativamente alla resa di prodotti liquidi si è ottenuta una selettività pari a SC5+ =0,82.

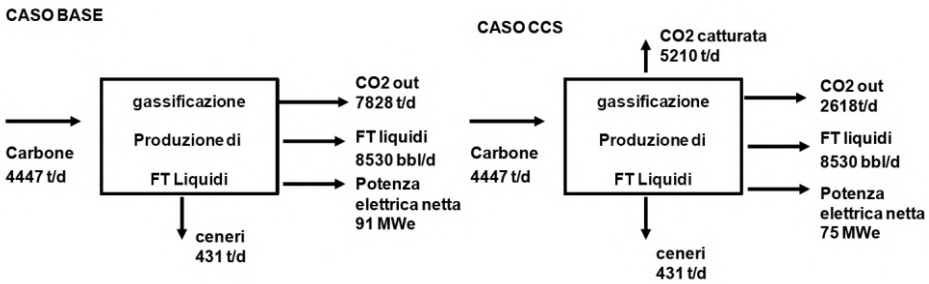


Figura 188. Schema dei principali input ed output delle due configurazioni

Lo studio sviluppato inoltre ha fornito le basi per stimare le emissioni globali associate alla conversione del carbone in prodotti liquidi ed energia elettrica, così da individuare le sezioni impiantistiche dove risulta più opportuno intervenire con tecnologie di cattura della CO_2.

L'analisi economica e finanziaria è stata svolta stimando l'attualizzazione dell'investimento ovvero il valore attuale netto, il TIR ed il pay back. La struttura finanziaria e le assunzioni utilizzate scelte sono quelle tipiche per la valutazione di fattibilità economica in impianti di potenza. Considerato il petrolio come il prodotto concorrenziale si è stimata la convenienza delle due configurazioni analizzate individuando il valore minimo del prezzo del greggio al fine di ottenere un TIR del 18%. I risultati indicano valori del costo di investimento dell'ordine di 95.300 $/bbl/giorno in linea con quanto riportato in letteratura, che si incrementano leggermente se si aggiunge la sezione di cattura. La redditività dell'iniziativa presenta tassi interni di rendimento dell'ordine del 18% per valori del barile di petrolio di 98 $/bbl, con un costo specifico di produzione del combustibile raffinato di circa 84 $/barile. L'impianto equipaggiato con le tecnologie CCS mostra una redditività (TIR al 18%) per valori del barile di petrolio dell'ordine dei 105 $/bbl.

In conclusione questo lavoro presenta i risultati di una prefattibilità tecnico-economica per un impianto di poligenerazione, individuando le condizioni di mercato per la sua convenienza. Si può desumere che la poligenerazione risulta un scelta conveniente in quanto presentando una flessibilità dell'impianto risponde più adeguatamente alle richieste diversificate dei prodotti energetici del mercato. Inoltre la localizzazione dell'impianto a bocca di miniera presenta il beneficio di un basso costo di approvvigionamento della combustibile e di un basso costo del trasporto della CO_2 che è stoccata on-site.

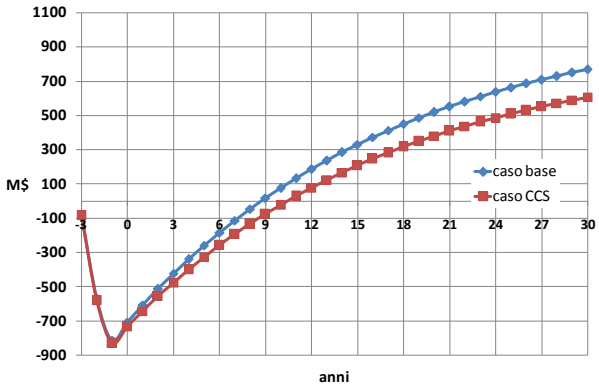


Figura 189. Andamento del VAN prezzo grezzo 98$/bbl e quota CO_2 10$/tCO_2

Il Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, ha condotto uno studio teorico e sperimentale volto alla messa a punto del processo attraverso sintesi di Fischer-Tropsch [Report RdS/2012/183].

Le attività svolte durante il periodo di riferimento possono essere suddivise in 4 task principali.

Il primo task ha riguardato la preparazione e la caratterizzazione di catalizzatori a base di ferro per la sintesi di Fischer-Tropsch. In tale ambito, sulla base di indicazioni di letteratura, è stata selezionata la tecnica di preparazione per co-precipitazione (Figura 190), in quanto porta a sistemi più attivi. In particolare si sono investigati alcuni parametri della procedura di preparazione quali l'effetto della presenza dei promotori, il tempo di maturazione ed il pH di co-precipitazione.

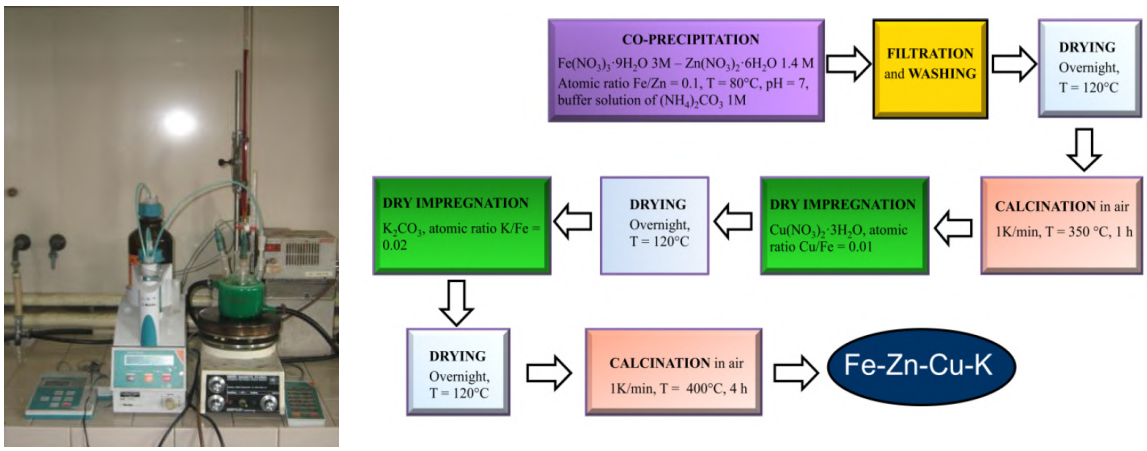


Figura 190. Apparato sperimentale per la co-precipitazione (e procedura seguita per la preparazione di un catalizzatore Fe-Zn-Cu-K

I risultati ottenuti hanno evidenziato il vantaggio della presenza dei promotori; in particolare si è riscontrato che l'aggiunta di zinco determina un incremento dell'area superficiale evitando il sintering dei cristalliti di ematite durante i processi termici, mentre la presenza di potassio e di rame garantisce una diminuzione della temperatura a cui iniziano i processi di riduzione del catalizzatore.

Il tempo di maturazione non comporta considerevoli variazioni delle proprietà morfologiche, strutturali e chimiche del catalizzatore. Diversamente il pH a cui avviene la co-precipitazione assume un ruolo chiave, in quanto porta alla sintesi di materiali cristallini se condotta a pH = 7 e di catalizzatori amorfi se condotta a pH = 6.

Il secondo task ha riguardato lo studio della reattività dei catalizzatori, preparati nel task 1, mediante prove di attività catalitica nella reazione Fischer-Tropsch. Il catalizzatore ottenuto co-precipitando con un pH = 7, cristallino, risulta essere attivo con conversione del CO del 22% in condizioni rappresentative della sintesi (T=220 °C, P=30 bar, GHSV= 6 NL/h/g_{cat}, rapporto molare H_2/CO pari a 2).

Inoltre il catalizzatore presenta bassa selettività a metano (< 3%), modesta selettività alla CO_2 (20%) e selettività a idrocarburi C_{5+} superiore al 50% (Figura 191).

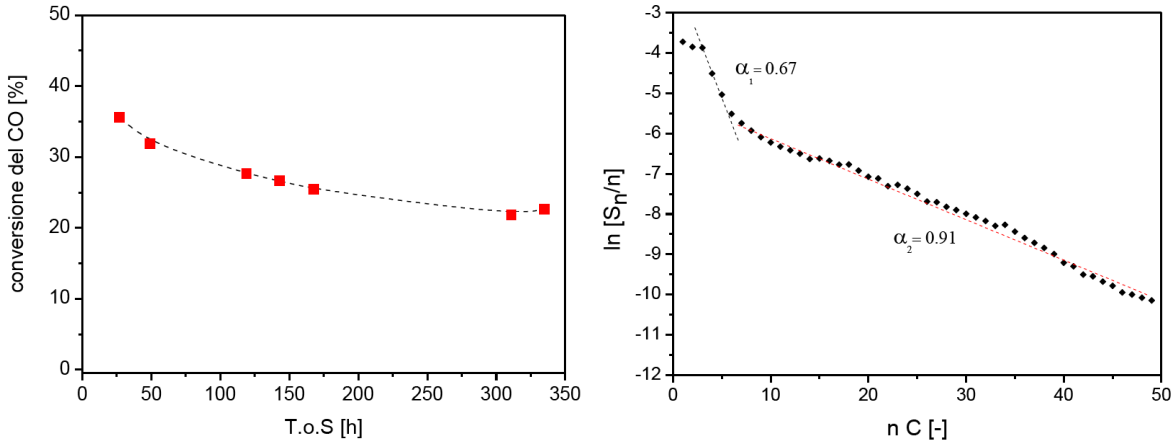


Figura 191. Conversione del CO in funzione del T.o.S. (sinistra) e distribuzione ASF degli idrocarburi totali (destra)

Il terzo task ha riguardato la progettazione e la costruzione di un impianto di laboratorio operante ad alta pressione per la sintesi di Fischer-Tropsch (Figura 192). Questo impianto è stato realizzato con la logica di poter effettuare attività di "screening" catalitico per individuare, in tempi ragionevoli, i catalizzatori e le condizioni operative ottimali per il processo.

Infine, l'ultimo task è stato relativo ad un'analisi di letteratura dei modelli cinetici utilizzati per la sintesi di Fischer Tropsch su catalizzatori a base di ferro.

Figura 192. Impianto Fischer-Tropsch

In conclusione al termine di questo anno di attività di ricerca si possono trarre le seguenti conclusioni:

- i catalizzatori a base di ferro necessitano di promotori strutturali, come lo zinco, che stabilizzano la struttura evitando fenomeni quale il sintering;
- i catalizzatori a base di ferro necessitano di promotori chimici, come potassio e rame poiché quest'ultimi consentono una notevole abbassamento (circa 100°C) della temperatura a cui iniziano i processi di riduzione;
- la formazione di una fase cristallina può essere controllata selezionando il pH a cui si effettua la co-precipitazione e questa sembra avere un ruolo durante la reazione di Fischer-Tropsch visto che il catalizzatore amorfo non ha una un'attività catalitica apprezzabile;
- il test di attività del catalizzatore Fe-Zn-Cu-K rivela una buona stabilità sia per quanto riguarda la conversione di CO sia per quanto riguarda la distribuzione dei prodotti.

Il nuovo impianto realizzato presso i laboratori del Politecnico consentirà di testare i catalizzatori, preparati individuando sia le composizioni che massimizzano la conversione e la selettività ai prodotti desiderati, ma che al tempo stesso godano di stabilità anche per tempi di marcia prolungati.

B. Aumento dell'efficienza delle tecnologie di cattura della CO_2 con produzione di elettricità "zero emission"

L'obiettivo prevede: lo sviluppo di tecnologie pre- e post-combustione, lo sviluppo di bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno prodotti da applicazioni pre-combustione, la messa a punto di tecnologie numeriche per l'ottimizzazione del processo di ossicombustione.

B.1 Attività sperimentali sulla cattura della CO_2 ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio

Sono stati effettuate le prime attività sperimentali sulla piattaforma sperimentale Zecomix, impianto integrato realizzato da ENEA per lo studio di processi di cattura della CO_2 con solventi solidi ad alta temperatura, e produzione di idrogeno per la generazione di energia. In queste brevi note sono descritti i primi risultati sperimentali, più compiutamente illustrati nel Report RdS/2012/184.

È stata proposta una procedura di start-up del gassificatore che ha consentito di definire le grandezze operative principali: portata di carbone, portata della fase di sostegno, velocità di fluidizzazione del letto, temperatura di ingresso dell'agente fluidizzante. Il raggiungimento di un buon grado di fluidizzazione consente un alto grado di combustione e gassificazione del carbone alimentato. A tal fine è stata calcolata la portata di aria affinché il materiale di sostegno scelto (olivina) raggiunga un buon grado di fluidizzazione, u=2,5umf, durante la combustione e gassificazione ad una temperatura di 800 °C. I risultati ottenuti sulle prime prove di fluidizzazione, in accordo con quanto previsto dalla teoria, mostrano che nel letto si è instaura un buon regime di fluidizzazione necessario per la contemporanea combustione e gassificazione del carbone in condizioni di *autotermicità.* Per minimizzare il consumo del combustibile ausiliario (metano) è stata fatta la scelta operativa di aggiungere durante il warm-up del gassificatore, il 10% in massa di carbone e poi gradualmente aumentare l'alimentazione di combustibile fino al valore stechiometrico. In questa fase, si è notato come l'aumento della temperatura dell'aria di fluidizzazione T_f è un indice dell'aumento della temperatura media all'interno del gassificatore. La temperatura T_f, infatti, cresce principalmente, grazie alla presenza di uno scambiatore di calore economizzatore che trasferisce il calore sensibile del gas all'uscita del gassificatore e l'aria di fluidizzazione. Il principale risultato ottenuto durante le prove di avviamento del reattore mostra come per ottenere un buon grado di fluidizzazione la temperatura di ingresso dell'aria di fluidizzazione T_f debba raggiungere un plateau tra 300 e 350 °C come riportato in Figura 193.

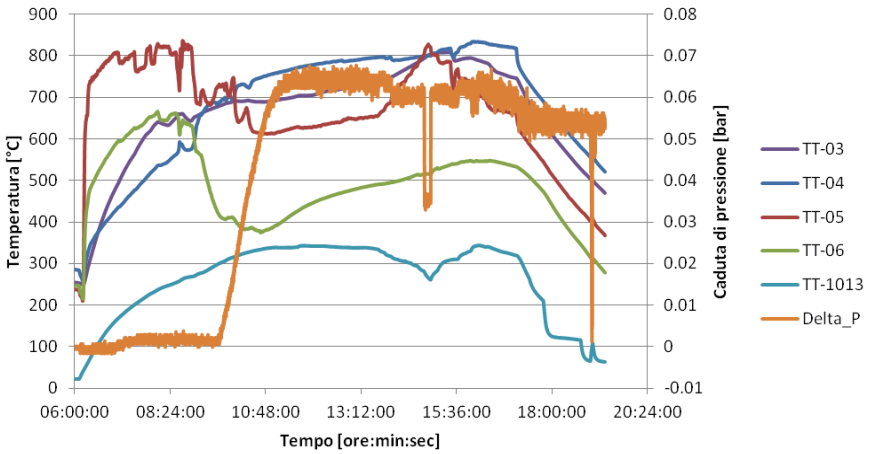


Figura 193. Andamento delle temperature e della caduta di pressione all'interno del letto

Tenuto conto di questo importante risultato, il bilancio di energia del gassificatore consente di determinarne l'*Equivalence Ratio* (ER) necessario per il calcolo sia della portata di vapore che di quella dell'ossigeno durante la gassificazione del carbone. Il bruciatore ausiliario è posto al di sopra della superficie del letto in modo che quando questo è fluidizzato i solidi vengono in contatto con il fronte di fiamma e vengono riscaldati. Quindi è necessario conoscere la quantità di olivina che bisogna caricare e l'altezza del letto quando questo risulta fluidizzato. Da un bilancio di forze risulta che l'altezza del letto durante lo start-up, T=500 °C, e durante la gassificazione rimane circa

costante a 67 cm. In seguito grazie all'elevata capacità termica dell'olivina così riscaldata è possibile raggiungere la temperatura operativa con un supporto minimo, o nullo, da parte del bruciatore di start-up. Sono necessarie dalle 3 alle 5 ore per portare il letto da temperatura ambiente alla temperatura di 500-600 °C. Il risultato principale delle prove di fluidizzazione è che l'istaurarsi del regime di fluidizzazione l'*eye-on-the-process* è sulla temperatura al di sopra della griglia e la temperatura di ingresso dell'aria di fluidizzazione.

Le prove di fluidizzazione sono state rese possibili attraverso il sistema di controllo della piattaforma ZECOMIX. L'intervento sul sistema di controllo della piattaforma ZECOMIX rientra nelle attività a supporto degli impianti sperimentali del Laboratorio ENEA-COMSO. Le attività svolte hanno avuto come obiettivo quello di far passare il sistema di controllo da una configurazione base, così come era stato fornito dalla società ASTEL (alla quale è stata commissionata la realizzazione), a una configurazione aggiornata e adattata alle esigenze di utilizzo specifico dell'impianto; in particolare (Figure 195 e 196):

- gestione della complessità intrinseca dell'impianto,
- adeguamento degli strumenti di gestione dell'impianto alle esigenze di attività sperimentale in termini di:
  - flessibilità nelle procedure operative,
  - precisione e affidabilità delle misure,
  - completezza e fruibilità dei dati sperimentali.

Una fase preliminare è stata necessaria per la riorganizzazione della documentazione tecnica dell'impianto e l'acquisizione di competenze sull'ambiente Freelance ABB.

Gli interventi sull'hardware e sul software hanno riguardato per prima cosa la sicurezza con l'implementazione di: l'arresto di emergenza generale, il sistema di allarmi e interblocchi e un sistema di lavaggio con azoto in grado di intervenire in modo puntuale nei vari skid con quantità di azoto diverse e garantire così la sicurezza e ottimizzare il consumo di azoto.

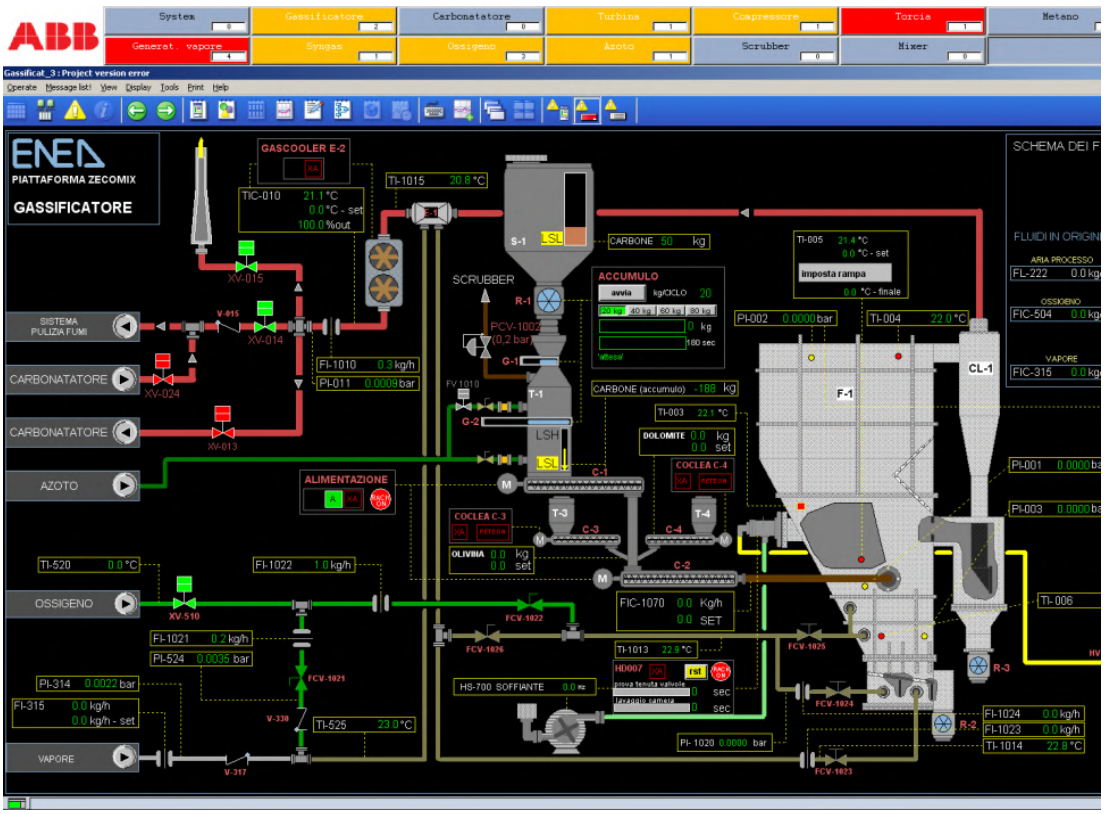


Figura 194. Sistema '*Distributed Control System*' (DCS): sinottico del gassificatore

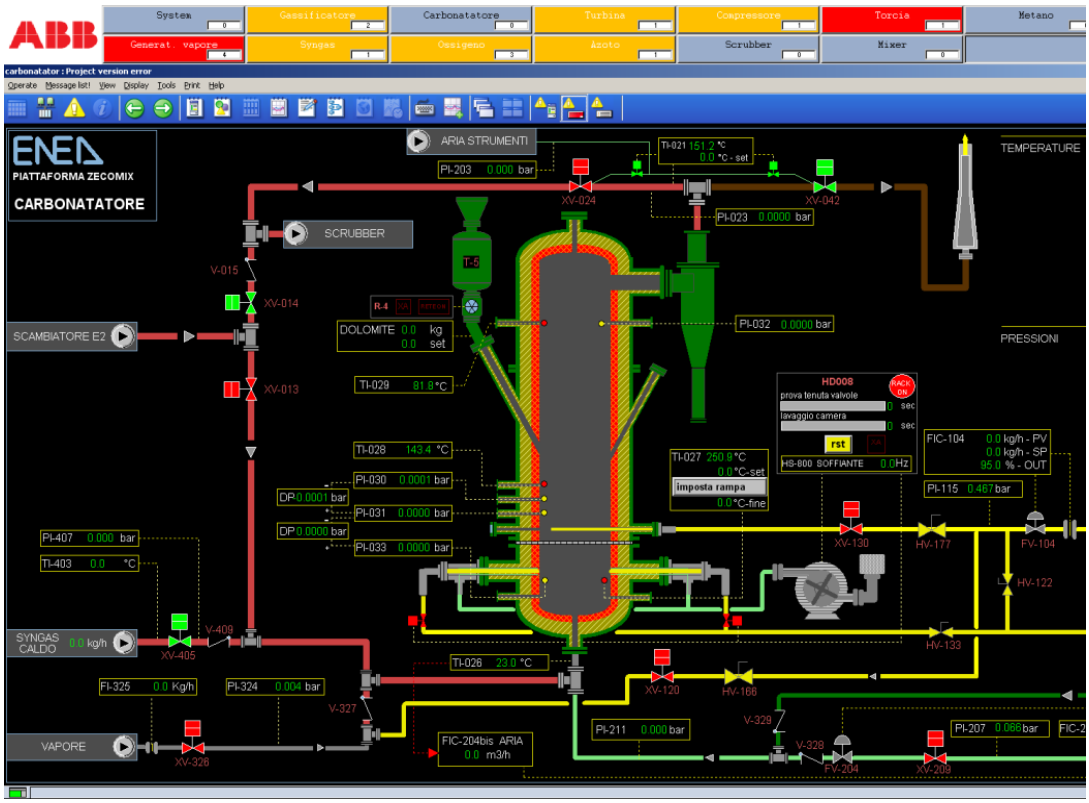


Figura 195. Sistema 'Distributed Control System' (DCS): sinottico del carbonatatore

Complessivamente il sistema permette buoni margini di manovra e sufficiente flessibilità (caratteristiche necessarie trattandosi di una piattaforma sperimentale), garantendo comunque i livelli di sicurezza richiesti dalle normative.

E' stato poi modificato il sistema di alimentazione del carbone per permettere il funzionamento del gassificatore per periodi prefissati (matrici sperimentali) anziché in continua (impianti di produzione), rendendo possibile caricare quantità prefissate di carbone e interrompere il funzionamento del gassificatore senza avere carbone accumulato nel sistema.

Sono stati realizzati strumenti di assistenza alle operazioni: uno per la realizzazione di set-point programmati, l'altro per l'azionamento automatico delle valvole on-off secondo 8 configurazioni operative prestabilite della piattaforma. Con l'aggiunta di 20 nuovi segnali al DCS sono state remotizzate funzioni in precedenza solo locali aumentando così la capacità di controllo del DCS stesso.

Infine sono state implementate tutte le funzioni di visualizzazione attraverso grafici e memorizzazione (datalogger) delle grandezze fondamentali e sono state implementate 3 nuove pagine grafiche (gestione allarmi, mixer gas, overview). Tutte le pagine grafiche sono state revisionate e adeguate alla visualizzazione sul nuovo set di display delle stazioni operatore (3 + 1 overview).

Come detto, l'impianto ZECOMIX prevede l'utilizzo di olivina nel reattore di gassificazione del carbone, e dolomite nel reattore di decarbonatazione del gas di sintesi prodotto a seguito della gassificazione del carbone. La messa a punto di questi catalizzatori, e in particolare dell'olivina, è stata oggetto di studio nell'ambito della collaborazione con l'Università degli Studi de L'Aquila, Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali.

Si è verificato sperimentalmente, a livello di laboratorio, l'attività catalitica posseduta dai campioni dell'olivina forniti dalla ditta Minerali Industriali S.p.A. (Sede di Masserano) che l'ENEA intende utilizzare nell'impianto pilota e l'eventuale necessità ed efficacia di trattamenti termici preventivi. Dagli studi di letteratura emerge che l'olivina, silicato doppio di magnesio e ferro, costituisce un ottimo catalizzatore primario delle reazioni di gassificazione, adatto in particolare per l'utilizzo nel gassificatore a letto fluido a causa delle ottime proprietà di resistenza meccanica all'abrasione, basso costo e perfetta compatibilità ambientale per quanto riguarda lo smaltimento delle ceneri. Le proprietà catalitiche dell'olivina sono legate essenzialmente alla presenza del ferro in forma libera nei diversi gradi di ossidazione, a seguito di un trattamento termico preliminare nel quale l'olivina naturale è calcinata

in muffola, impostando una rampa di circa 3 °C/min fino a 1100 °C, seguita da una stasi di 4 ore. Sono state condotte alcune prove sperimentali sull'impianto di gassificazione all'interno del laboratorio "Energia e Ambiente" della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Teramo, in un reattore a letto fluido bollente di 0,1 m di diametro interno, valutando le buone performance del reforming primario del tar, in relazione alle condizioni operative adottate e al trattamento termico condotto su questo catalizzatore naturale, dimostrando che il materiale preso in esame è attivo anche senza trattamento termico ottenendo la resa in gas (su base secca e priva di azoto) superiore a 1,40 Nm^3/kg di biomassa [Report RdS/2012/186], un contenuto di tar intorno a 1,5 g/Nm^3 di gas prodotto e un gas di sintesi con il contenuto di H_2 di circa il 44% (Figura 196).

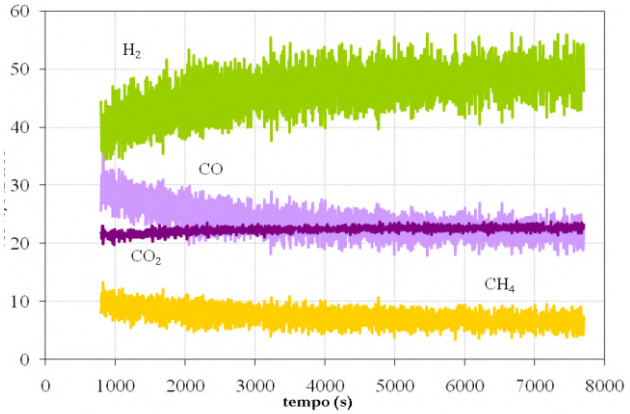


Figura 196. Andamento della portata di gas prodotto e delle composizioni percentuali di idrogeno, anidride carbonica, monossido di carbonio e metano in funzione del tempo

D'altro canto, l'utilizzo di idrotalciti a base di calcio come sorbenti per la CO_2 risulta efficientemente vantaggioso se accoppiato alle reazioni di Water Gas Shift o di Reforming, nei così detti SEP (Sorption Enhanced Process). Presso il Laboratorio di Reattori Chimici dell'Università degli Studi de L'Aquila sono state sintetizzate un' idrotalcite a base di calcio ed una promossa con K_2CO_3 attraverso il metodo d'impregnazione ad umido. Le idrotalciti, sono state quindi testate attraverso cicli termo gravimetrici di adsorbimento e desorbimento in due diversi set di condizioni operative. Il primo nelle condizioni di WGS (P=1 bar; T_{ads}= 350 °C; T_{des}=450 °C; 20%v CO_2) in 15 cicli ha riportato una bassa capacità adsorbente, non confrontabile con i valori di letteratura delle idrotalciti a base di Mg, il secondo nelle condizioni operative di ZECOMIX *(*P=1 bar; T_{ads}= 600 °C; T_{des}=850 °C; 25%v CO_2) in 20 cicli riportano una capacità sorbente elevata e confrontabile con quella dell'ossido di calcio e stabile durante all'aumentare del numero di cicli. I sorbenti caratterizzati attraverso analisi SEM ed EDX mostrano una composizione eterogenea, e la presenza di carbonato di calcio interdisperso sulla matrice di ossidi misti, che spiegherebbe la differenza di comportamento nelle diverse condizioni operative. Tale ipotesi è stata avvalorata dall'analisi di decomposizione termica effettuata in TGA con una lenta rampa (2 °C/min) da temperatura ambiente fino a 1000 °C. L'idrotalcite a base di calcio perde inizialmente l'H_2O di struttura, quindi inizia una deidrossilazione e decarbonatazione che si conclude a circa 750 °C. L'analisi DSC evidenzia una variazione dei flussi temici in corrispondenza del valore finale di plateau della curva della variazione in peso (750-1000 °C) legata ad un ri-arrangiamento strutturale, probabilmente alla formazione di alluminati di calcio. I risultati di assorbimento sono mostrati in Figura 197.

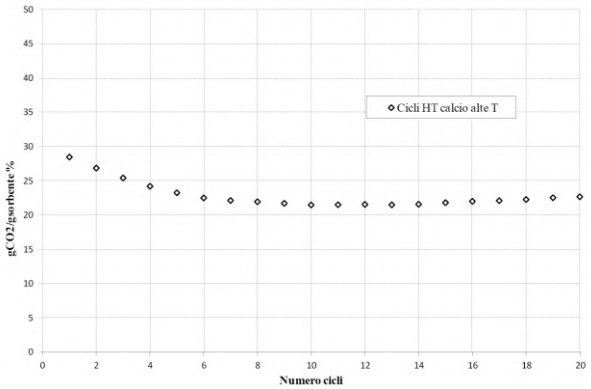


Figura 197. Cicli di adsorbimento/desorbimento TGA T=600°C, P_{CO2}=0,25 bar

Infine viene studiato l'effetto di un particolare trattamento (pre-carbonatazione) sul sorbente CaO-$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$. Sono stati analizzati campioni al microscopio elettronico mostrando la variazione della morfologia dovuta alla pre-carbonatazione [Report RdS/2012/228]. Il lavori sui sorbenti solidi viene completato attraverso l'implementazione di un modulo in per la simulazione di un letto fluido di particelle di sorbente per la separazione di CO_2 e la produzione di idrogeno [Report RdS/2012/185].

B.2 Studi modellistici e sperimentali sui processi di cattura della CO_2 con solventi

Sul tema specifico della cattura mediante solventi, le attività svolte da SOTACARBO hanno riguardato la messa a punto di un impianto GAIA (Figura 198) per la sperimentazione su ammine in scala laboratorio e la relativa sperimentazione.

Sono stati eseguiti test sull'assorbimento dell'anidride carbonica, facendo variare i seguenti parametri operativi:

- composizioni dei solventi (soluzioni acquose di MEA, MDEA e PZ a varie concentrazioni);
- composizione del gas (analizzando il comportamento del processo al variare della concentrazione di CO_2);
- rapporto L/G, entro i limiti imposti dal sistema (che comunque verranno ampliati mediante una modifica del sistema di distribuzione del gas, di seguito specificata).

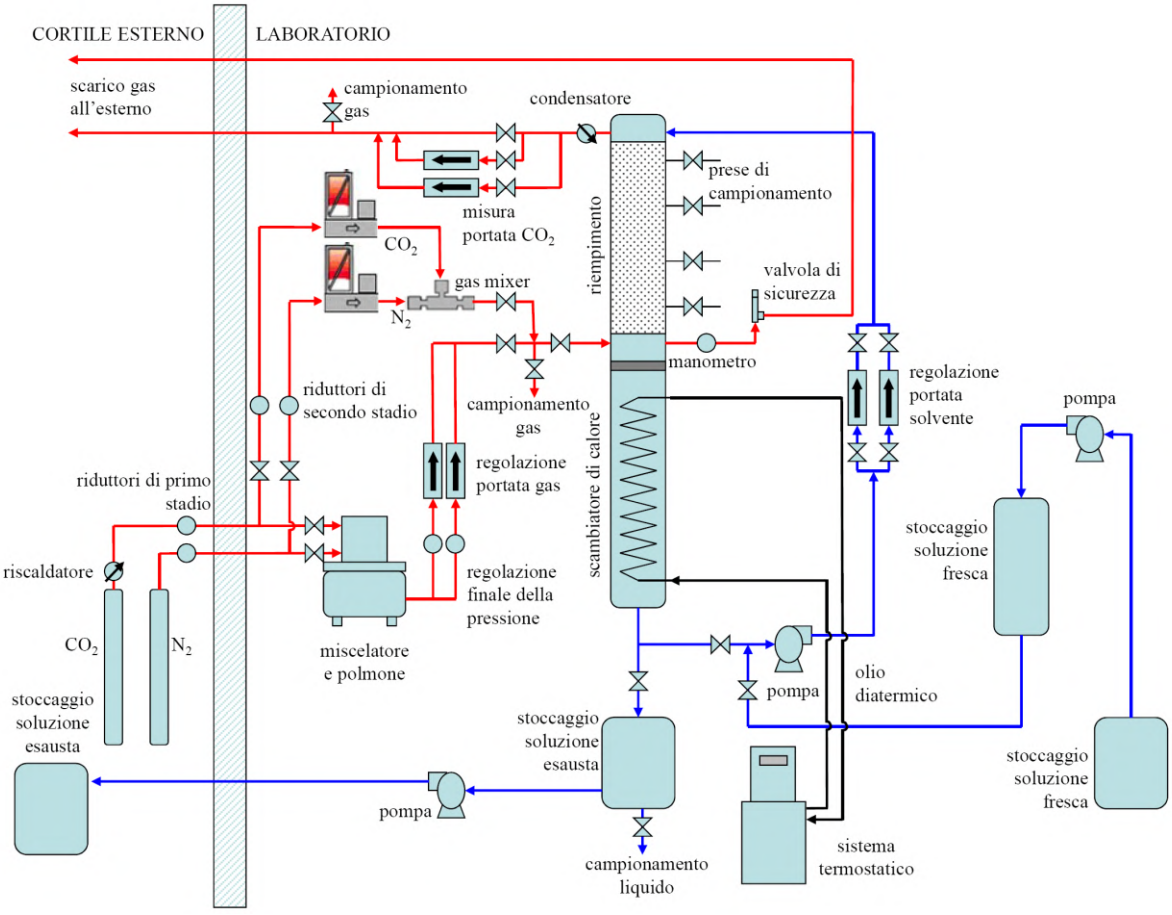


Figura 198. Impianto GAIA: schema di processo

Durante i numerosi test sono state apportate all'impianto da banco alcune modifiche, quali:

- l'installazione dei nuovi misuratori/regolatori massici per la miscelazione dei gas tecnici (CO_2 ed N_2);
- l'installazione del sistema termostatico e prime verifiche;
- l'inserimento manometri;
- la realizzazione della coibentazione dell'impianto bench scale
- la sostituzione del primo serbatoio di scarico del solvente con uno realizzato in acciaio e dotato di indicatore di livello;

- l'installazione dei riduttori di pressione di II stadio a monte dei massici;
- la sostituzione dei condotti flessibili in gomma impiegati per alimentazione e ricircolo del solvente con condotti in acciaio;
- la sostituzione della guardia idraulica con l'inserimento di una valvola di sicurezza;
- l'installazione di un sistema di misurazione della portata di CO_2 desorbita dalla soluzione amminica in fase di rigenerazione;
- l'installazione di un sistema di condensazione per i gas all'uscita della colonna,

ed è stato necessario eseguire ulteriori prove preliminari per la messa a punto dell'impianto per ottimizzare i parametri di processo alla luce dei nuovi sistemi inseriti.

Maggiori dettagli sulle attività sono desumibili dai Report RdS/2012/224, 189, 187 e 188.

La maggior parte delle ricerche riguardanti la separazione della CO_2 con MEA hanno come scopo la modellazione e l'ottimizzazione dell'impianto di cattura in stato stazionario.

Per tener conto degli aspetti dinamici, legati alla regolazione controllo di un impianto reale, l'Università di Cagliari, Dipartimento Ingegneria Meccanica, Chimica e Materiali, ha condotto uno studio relativo all' Analisi e modellazione dinamica di impianti di cattura postcombustione della CO_2 che utilizzano solventi a base di ammine

Gli studi sulla cattura della CO_2 con MEA in condizioni dinamiche sono prevalentemente incentrati sullo sviluppo di un modello matematico che descriva le due colonne di assorbimento e rigenerazione[9,10] .Poche ricerche focalizzano la loro attenzione sulle prestazioni e sulla stabilità dell'impianto, oltre che sul sistema di controllo che è lo scopo di questa ricerca[9-11].

Inizialmente sono state studiate le fonti di letteratura riguardanti la modellazione dell'impianto di cattura in stato stazionario; a partire dalle indicazioni riportate in tali studi è stato dimensionato ed ottimizzato un impianto per la separazione con MEA dell'anidride carbonica prodotta da una centrale elettrica USC di taglia 660 MWe pre-cattura. La simulazione sviluppata è stata adoperata per l'implementazione di un modello di impianto si cattura con MEA sempre riferito ad una centrale elettrica USC, ma questa volta di taglia 250 MWe post-cattura, così da poter uniformare i risultati ottenuti con quelli riportati in letteratura e renderne più agevole il confronto.

Entrambe le simulazioni in stato stazionario sono state implementate con il software commerciale Aspen Plus®.

La simulazione riferita all'USC da 250 MWe è stata esportata in Aspen Plus Dynamics®, il software commerciale adoperato per l'analisi dell'impianto di cattura nel dominio del tempo.

Lo studio del modello dinamico ha confermato la necessità di un adeguato sistema di controllo atto a garantire stabilità al sistema oltre che una separazione conforme alla specifica del 90% della CO_2 prodotta. I risultati ottenuti, infatti, hanno mostrato non solo che un disturbo nell'alimentazione determina una variazione della percentuale di anidride carbonica che si riesce a separare, ma anche che l'impianto non raggiunge una nuova condizione di stazionarietà con un conseguente accumulo o dissipazione dell'acqua contenuta nel solvente, come mostrato nella Figura 199.

Per questo sono state proposte due configurazioni di controllo la prima delle quali è stata sviluppata per essere implementata nel caso in cui l'impianto di cattura fosse soggetto a variazioni nel carico dei fumi prodotti dalla centrale; la seconda configurazione, invece, è stata progettata nel caso in cui l'impianto operi a carico sostanzialmente costante e fosse soggetto solo a piccoli disturbi.

[9] Gaspàr, J., & Cormos, A. M. *International Journal of Greenhouse Gas Control* (2012), 45-55

Ziaii, S., Rochelle, G. T., & Edgar, T. F. Dynamic modelling to minimize energy use for CO2 capture in power plants by aqueous monoethanolamine. (2009) http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie801385q

[10] Lin, Y.-J., Thian-Hong, P., Wong, D. S.-H., & Jang, S.-S "Plantwide Control of CO_2 Capture by Apsorption and Stripping Using Monoethanolamine Solution", 2011 American Control Conference on O'Farrell Streett, (pp. 5067-5172). San Francisco, CA, USA.

[11] Harun, N., Nittaya, T., Douglas, P. L., Croiset, E., & Ricardez-Sandoval, L. A. (2012). Dynamic simulation of MEA absorption process for CO2 capture from power plants. International Journal of Gteenhouse Gas Control (10), 295-309

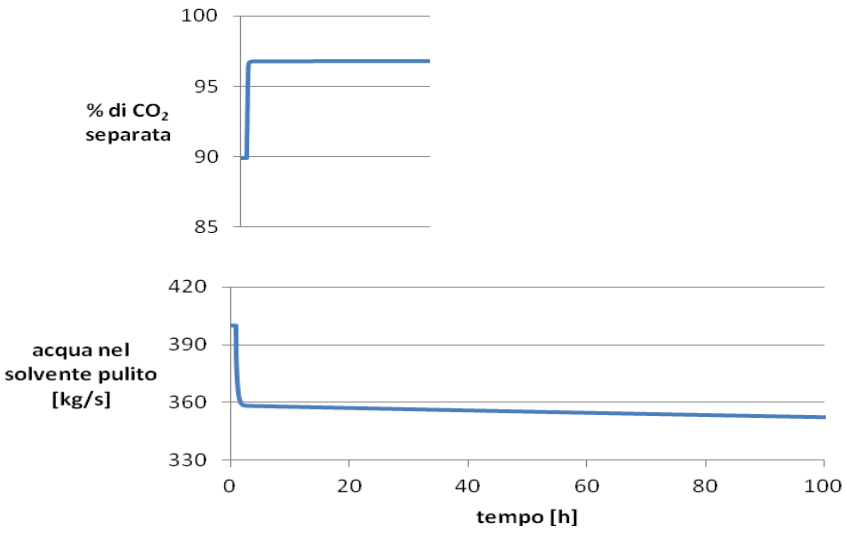


Figura 199. Profili temporali della percentuale di CO_2 separata e dell'acqua contenuta nel solvente; i valori calcolati sono il risultato di una riduzione a gradino del 10% della portata di gas trattato al tempo t = 1 h

Dai test effettuati sulle due configurazioni è stato possibile vedere che entrambe conferiscono stabilità all'impianto e garantiscono una separazione del 90% della CO_2 prodotta.

A titolo d'esempio, in Figura 200 sono state riportate le prestazioni della configurazione di controllo 1 nel caso in cui la portata dei fumi presentasse delle oscillazioni sinusoidali di ampiezza pari ±10% rispetto al valore di progetto e periodo di 24 ore. Tale disturbo è stato indotto al fine di testare le possibili ripercussioni che la differente richiesta energetica tra il giorno e la notte potrebbe avere sulla centrale elettrica e dunque sulla sezione di abbattimento CO_2. Come si può vedere dal grafico, anche in questa situazione, il sistema di controllo progettato garantirebbe la separazione del 90% della CO_2 prodotta dalla centrale elettrica oltre che stabilità all'impianto di cattura nell'arco temporale di una settimana.

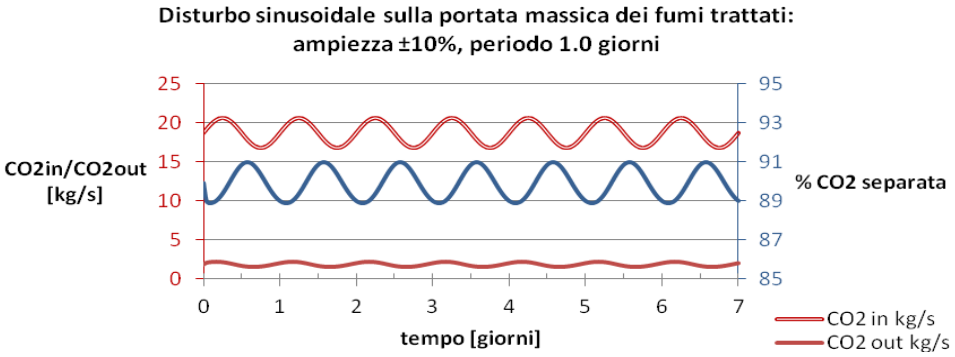


Figura 200. Prestazioni della configurazione di controllo 1 nel caso in cui sia abbiano variazioni sinusoidali della portata di fumi trattati. L'ampiezza del disturbo è pari a ±10% del valore di progetto ed il periodo di oscillazione è di un giorno

L'anidride carbonica è, probabilmente, l'unico prodotto rinnovabile a disposizione in quantità illimitata; la sua cattura da sistemi industriali stazionari e la sua trasformazione in prodotti utili è una delle sfide più urgenti e impegnative.

In alternativa all'uso di ammine in forma tradizionale, sono da tempo oggetto di ricerca altre soluzioni che risultino più vantaggiose dal punto di vista economico o sotto il profilo della sicurezza nell'impianto o dal punto di vista dell'impatto ambientale. I risultati dell'attività sono descritti nel Report RdS/2012/191.

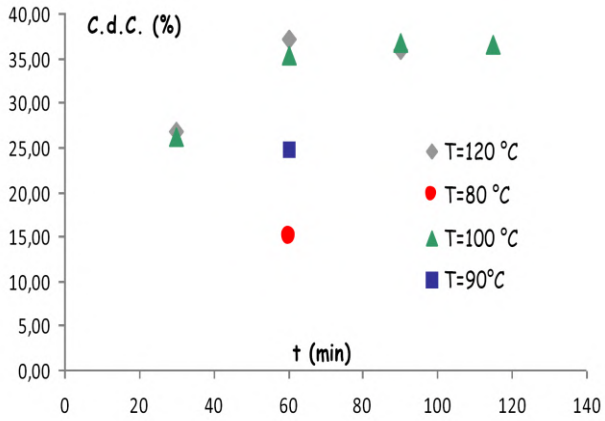


Figura 201. capacità di carico (CdC: moli di CO_2 assorbita per moli di resorcina) per quattro diverse temperature, con p_{CO2} = 3 bar

A tale scopo l'ENEA ha proposto, già dallo scorso anno, un processo alternativo, brevettato, basato sull'uso di resorcina (1,3 diidrossi-benzene). Tale soluzione può risultare alternativa alle ammine, poiché opera negli stessi intervalli di temperatura e perché si tratta di assorbimento di CO_2 da soluzioni liquide.

I principi su cui si basa l'uso della resorcina (1,3 diidrossi-benzene) sono stati riportati nel rapporto relativo alla precedente annualità, a cui si rimanda. Nel corso della presente annualità del progetto è stata iniziata una indagine sistematica [Report RdS/2012/195], in un apparato sperimentale controllabile, sui principali parametri sperimentali che influiscono sulle proprietà di assorbimento della CO_2 da parte di una soluzione alcalina di resorcina. L'indagine è stata limitata alla sola fase di assorbimento variando la temperatura di assorbimento e la pressione parziale della CO_2 (Figura 200).

Il prodotto dell'assorbimento, cioè l'acido diidrossi-benzoico, è stato caratterizzato mediante spettroscopia IR. In funzione delle condizioni sperimentali, sono state calcolate le diverse capacità di carico (la quantità molare di CO_2 assorbita per mole di resorcina) ed efficienza di assorbimento (la quantità molare di CO_2 assorbita per mole di CO_2 inviata). I valori ottenuti per questi due parametri sono confrontabili con i corrispondenti ottenuti quando si usano ammine, confermando quindi la resorcina come una possibile alternativa alle ammine. L'attività futura sarà focalizzata sulla fase di desorbimento e sull'analisi della ciclicità delle operazioni

Nell'ambito di una collaborazione con l'Università di Firenze, Dipartimento di Chimica "Ugo Schiff", è stata condotta una ricerca finalizzata a "Indagini sperimentali sulla cattura di CO_2 con nuovi metodi a basso consumo energetico" [Report RdS/2012/190].

In questo ambito è stata condotta una ricerca sperimentale sulle proprietà assorbenti dell'ammina 2-ammino-2-metil-1-propanolo (AMP) in miscele di glicol etilenico (EG) con etanolo o propanolo.

L'assorbimento di CO_2 al 12% è stato condotto in un sistema continuo a ciclo chiuso con rigenerazione termica di AMP a pressione ambiente. In ambiente non acquoso, CO_2 è catturata come carbammato dell'ammina AMP e come carbonato degli alcoli. Le quantità relative di carbammato e carbonato alchilico dipendono dal rapporto CO_2/AMP. L'efficienza di assorbimento è compresa fra 80 e 95% e dipende da numerosi parametri quali la concentrazione dell'ammina (2-3 mol dm^{-3}), le temperature di assorbimento (20-30 °C) e di desorbimento (80-90 °C) e le tecniche di desorbimento.

I vantaggi di questa tecnica water-free rispetto a quelle tradizionali in acqua sono:

- risparmi energetici dovuti al minor calore specifico e di evaporazione degli alcoli rispetto all'acqua (ca. il 50%) ed al minore differenziale fra la temperatura di assorbimento e di rigenerazione;
- risparmi economici dovuti all'assenza di decomposizione dell'ammina sia per la minore temperatura di rigenerazione sia per la maggiore stabilità termica di AMP rispetto alle ammine tradizionali; minore o assenza di fenomeni di corrosione degli impianti.

In conclusione, i dati sperimentali della ricerca indicano che gli assorbenti non acquosi formulati hanno la potenzialità di coniugare l'elevata efficienza di assorbimento delle soluzioni acquose pur riducendone i loro svantaggi.

Sono state condotte poi indagini sperimentali sulle reazioni di CO_2 con resorcinolo in soluzioni acquose basiche di KOH, K_2CO_3 e $KHCO_3$ con rapporti resorcinolo/base 1/1, 1/1,5 e 1/2. Le reazioni sono state condotte con flusso di CO_2 puro alla temperatura di 90 °C a pressione atmosferica e le specie formate in soluzione sono state analizzate mediante spettroscopia NMR di ^{13}C. A seconda della base impiegata, del rapporto resorcinolo/base e del tempo di assorbimento, si forma l'acido 2,4-diidrossobenzoico (acido β-resorcinico) con una resa massima 57%. La decomposizione termica (a 150 °C) della miscela di reazione riduce di circa il 50% l'acido e ripristina fino al 70% la resorcina. Pur impiegando condizioni di reazione più blande dei metodi tradizionali, si sono ottenute rese maggiori dell'acido β-resorcinico. In prospettiva, nella prossima annualità, verrà approfondito, nell'ambito della collaborazione ENEA-Università di Firenze, il desorbimento e quindi la ciclicità del processo, mentre la caratterizza-

zione sperimentale avrà un'impostazione più sistematica. Verrà inoltre approfondita l'influenza dell'ossigeno e dei solforati sull'intero processo.

B.3 Sviluppo di bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno

L'attività, intrapresa da ENEA già nella precedente annualità, è finalizzata allo sviluppo di bruciatori innovativi per turbine a gas, in grado di realizzare una combustione in assenza di fronte di fiamma (tecnologia MILD), stabile, efficiente, e a basse emissioni, particolarmente indicata per la combustione di syngas ricchi di idrogeno provenienti da impianti con cattura della CO_2, operanti in modalità "pre-combustion".

L'attività nella presente annualità si è articolata nelle seguenti fasi:

- modifiche al progetto di bruciatore sviluppato nella precedente annualità;
- simulazioni CFD relative al nuovo progetto;
- progetto esecutivo del nuovo bruciatore;
- valutazione sperimentale della fluidodinamica ed aeroacustica del bruciatore;
- realizzazione del bruciatore e sua installazione sull'impianto MICOS modificato.

Sfruttando il principio dei vortici intrappolati è stato progettato un bruciatore prototipo ENEA [RdS/2012/193]**.** Il lavoro prende spunto dal progetto messo a punto nel corso della precedente annualità, apportando ulteriori modifiche. Il corretto dimensionamento della cavità e del pattern fluidodinamico al suo interno, consente la creazione di vortici stabili che scambiano calore e materia con il flusso in ingresso, creando così le condizioni per l'instaurazione di un regime di combustione *MILD*.

L'introduzione di tecnologie *MILD* nella combustione pressurizzata è potenzialmente in grado di dare risposta a due esigenze principali: un livello di emissioni molto basso e un'intrinseca stabilità termoacustica (*humming*).

Le turbine a gas oggi disponibili sono state sviluppate per funzionare a gas naturale e adattate per bruciare syngas, pur non essendo ottimizzate per questa applicazione.

Le differenze di una combustione a syngas anziché a gas naturale sono principalmente due:

- a parità di potenza, la portata di combustibile deve essere 4-5 volte maggiore rispetto al gas naturale, a causa del più basso potere calorifico;
- la combustione premiscelata di gas naturale e aria è uno dei metodi più utilizzati per il contenimento delle emissioni di NO_x attraverso il mantenimento di temperature di fiamma sufficientemente basse. Questa tecnica risulta pericolosa con il syngas per la presenza significativa di idrogeno ed il conseguente pericolo di ritorno di fiamma nei sistemi di iniezione. Per questo motivo è necessario ricorrere a fiamme diffusive non premiscelate o utilizzare diluenti come azoto, anidride carbonica e vapore, per contenere le temperature di fiamma e quindi gli NO_x.

Rispetto alle problematiche esposte, la tecnologia Trapped-Vortex presenta diversi vantaggi:

- è possibile bruciare una grande varietà di combustibili a medio e basso potere calorifico;
- si può operare in regime di combustione premiscelata povera di combustibile, data la capacita di sostenere velocità di immissione molto elevate, che scongiurano il pericolo di ritorno di fiamma;
- le emissioni di NO_x raggiungono livelli estremamente bassi senza l'aggiunta di gas diluenti o di trattamenti di post-combustione, perché si realizzano condizioni di combustione *MILD*;
- può essere adottata su diversi tipi di turbine grazie alla riduzione complessiva delle portate effluenti;
- migliora il rendimento globale del ciclo termodinamico grazie alla riduzione delle perdite di pressione nel combustore;
- determina l'estensione dei limiti di spegnimento e una migliore stabilità di fiamma.

Nella fase preliminare lo studio è stato limitato ad un settore rettificato della camera anulare, anche perché il prototipo realizzato [Report RdS/2012/192] è stato così costruito, per semplicità realizzativa e di misura.

La potenza di riferimento è 100 kW termici, date le caratteristiche dell'impianto sperimentale sul quale il prototipo è stato installato (impianto MICOS), in condizioni di pressione atmosferica. L'aria di combustione sarà alimentata a 700 K, corrispondente ad un rapporto di compressione di circa 20, per simulare le reali condizioni operative. Il syngas utilizzato ha la seguente composizione in volume:

$$19\%\ H_2 - 31\%\ CO - 50\%\ N_2 \qquad \text{LHV 6 MJ/kg.}$$

La tecnica più ovvia per realizzare un moto vorticoso in un volume che rappresenta la camera di combustione è quella di immettervi uno o più flussi tangenziali. Si è pensato quindi di disporre due flussi tangenziali di aria i quali

promuovono la formazione del vortice, mentre altri flussi contrapposti di combustibile e aria primaria distribuiti verticalmente ne alimentano il cuore. Un grosso sforzo è stato fatto per modulare opportunamente portate e velocità, e quindi quantità di moto relative, dei flussi nonché dimensioni minime della camera di combustione. È evidente che la distribuzione degli inlet di aria, gioca un ruolo fondamentale nella creazione di un vortice abbastanza energizzato, che riesca a creare dei tempi di residenza sufficienti a una diluizione dei reagenti che possa dar luogo a una combustione flameless. Infatti nella configurazione adottata si è instaurato un perfetto equilibrio tra l'azione dei flussi tangenziali, che tendono a generare il vortice, e l'azione dei flussi verticali che tendono a distruggerlo. In questo senso è bene sottolineare che è soprattutto il flusso tangenziale più distante dall'uscita ad essere determinante. Gli effetti negativi sulla posizione e la dimensione del vortice, conseguenti ad una riduzione di portata di quest'ultimo, sono risultati evidenti. Anche la distanza tra le file verticali di fori è stata opportunamente calibrata. Infatti il flusso tangenziale superiore deve passare tra i flussi verticali disposti sulla parete opposta. Se lo spazio di attraversamento è troppo ridotto, non riesce a restare aderente alle parete ed il vortice viene distrutto.

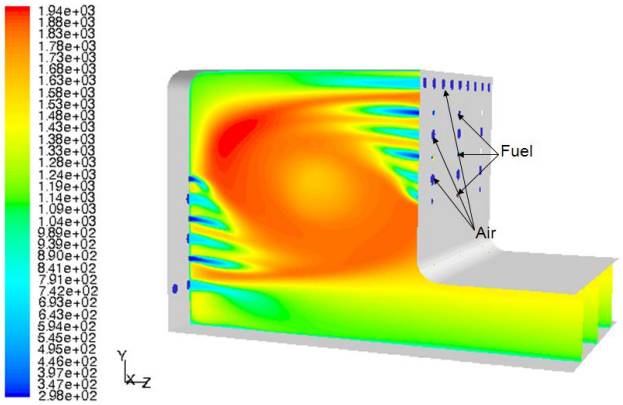


Figura 202. Distribuzione di temperature (K)

Fissata la geometria e la configurazione della camera di combustione del nuovo bruciatore trapped-vortex, sono state condotte simulazioni termofluidodinamiche RANS allo scopo di effettuare un'analisi di sensibilità ai principali parametri di funzionamento. In particolare si sono variati il rapporto aria/combustibile, le velocità e le portate dei flussi in ingresso al combustore (e di conseguenza le dimensioni delle sezioni), la composizione del gas.

È stata inoltre verificata la scalabilità del sistema. Siccome il principio di funzionamento del sistema si regge su equilibri di carattere fluidodinamico, si pensi al discorso fatto sul vortice, si è scelto di utilizzare il metodo della velocità costante. In particolare si è scelto di scalare il sistema mantenendo costanti le velocità di immissione dei flussi coinvolti. Come è stato già detto, il sistema progettato, per il target di potenza fissato, è caratterizzato da una densità di potenza non molto elevata. Se si immagina di dimezzarne tutte le dimensioni, il volume risulterà ridotto di un fattore 0,5x0,5x0,5=0,125, mentre le sezioni di 0,5x0,5=0,25. Considerando che le velocità sono rimaste costanti, le portate in gioco saranno quindi scalate di un fattore 0,25. Pertanto la densità di potenza (Potenza/Volume) aumenterà di un fattore 0,25/0,125=2. Seguendo lo stesso ragionamento, se si immagina di raddoppiare le dimensioni, la densità di potenza si ridurrà di un fattore 2. Dalle simulazioni effettuate è risultato peraltro che il comportamento del bruciatore rimane invariato, tanto che i campi di velocità, temperatura, specie etc. sono perfettamente sovrapponibili, qualunque sia la pressione dell'aria in ingresso

Con lo scopo di valutare il comportamento del prototipo in regime dinamico non stazionario, è stata effettuata anche una analisi con approccio LES (Large Eddy Simulation). Dai risultati è apparso abbastanza chiaro che il vortice resta bloccato nella cavità, senza subire evidenti contrazioni o espansioni. I risultati RANS ed i campi medi LES sono molto simili. La principale differenza rispetto alle RANS sta nei picchi di temperatura che sono più elevati, con differenze massime di circa 150 K.

L'attività di ricerca svolta dall'Università Roma TRE [Report RdS/2012/194)**,** a supporto di quella ENEA, è stata mirata alla studio sperimentale della fluidodinamica ed aeroacustica del combustore *Trapped Vortex* di geometria iniziale assegnata. Il lavoro svolto è riassumibile in cinque fasi di seguito elencate:

1. realizzazione dei prototipi per la sperimentazione, schermatura e realizzazione dell'impianto di adduzione aria, ideazione e realizzazione del sistema collettore/muffler, implementazione del software di gestione dell'impianto, set-up sperimentale (Figura 203);

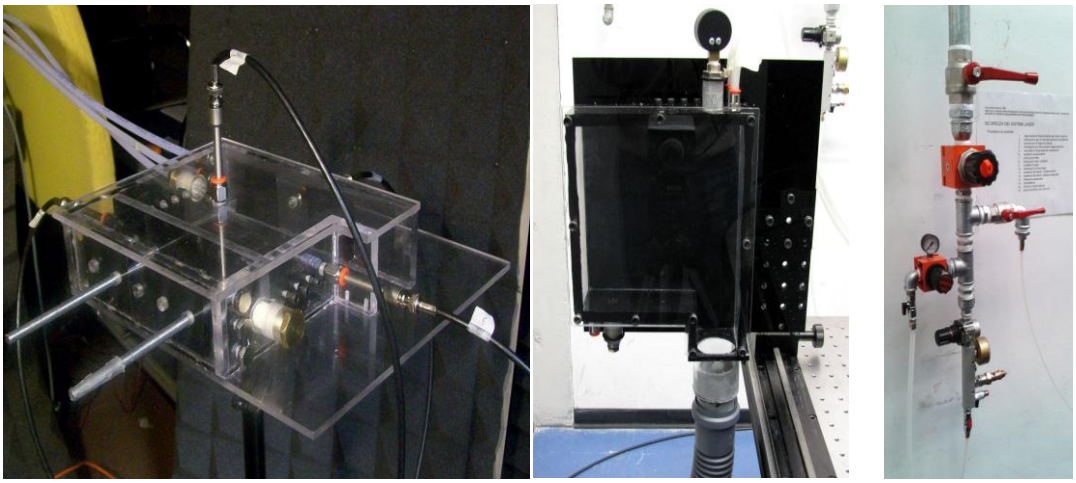


Figura 203. (a) Test case realizzato per le prove acustiche in camera semi-anecoica. (b) Test case realizzato per le prove di fluidodinamica mediante tecnica PIV. (c) Centralina dell'impianto di alimentazione

2. individuazione dei parametri geometrici rilevanti mediante analisi di sensibilità, studio sperimentale acustico ed aeroacustico al variare dei parametri sensibili individuati;
3. implementazione di un modello FEM per la simulazione dei modi acustici del combustore nel suo funzionamento a freddo;
4. studio fluidodinamico al variare dei parametri d'interesse mediante tecnica PIV;
5. redazione delle linee guida per la progettazione di un combustore *trapped vortex* di nuova generazione con requisiti aeroacustici e fluidodinamici ottimizzati.

A seguito dell'attività di ricerca sono stati individuati tre modi acustici propri della cavità in esame. Il primo, il più importante per la combustione, è un modo volumetrico della cavità e si sviluppa tipicamente nelle geometrie che si comportano come risuonatori di Helmholtz (Figura 204b). È stato infatti verificato che questo modo segue la medesima legge di scala di un risuonatore. In sede di sperimentazione si è notato che riducendo la profondità della cavità l'ampiezza del primo modo acustico si riduce notevolmente. Tale trend è stato riscontrato sia durante i test acustici modali che durante quelli aeroacustici (Figura 204c e d). La presenza di modi acustici molto energetici, come in questo caso, è un requisito comunemente indesiderato nelle camere di combustione poiché potrebbe promuovere, in condizioni reattive e nei casi più gravi, fenomeni d'instabilità termoacustica.

Dal punto di vista puramente fluidodinamico invece la riduzione della profondità della cavità comporta fenomeni di tipo indesiderato, quali la riduzione dell'intensità del vortice principale, la cui presenza favorisce il mescolamento tra gas ed aria, e l'innesco di fenomeni dinamici indesiderati (usualmente definiti come *flapping, wandering e bouncing*) che possono inficiare la stabilità di funzionamento del combustore e promuovere il meccanismo d'instabilità fluidodinamica della combustione (Figura 204e, f e g)). In sintesi, i requisiti acustici del combustore migliorano riducendo la profondità della cavità, mentre quelli fluidodinamici degradano. Dalle numerose analisi effettuate è stato possibile concludere che la geometria con profondità D=160mm sembra essere la configurazione di miglior compromesso tra le migliori performance fluidodinamiche e quelle acustiche.

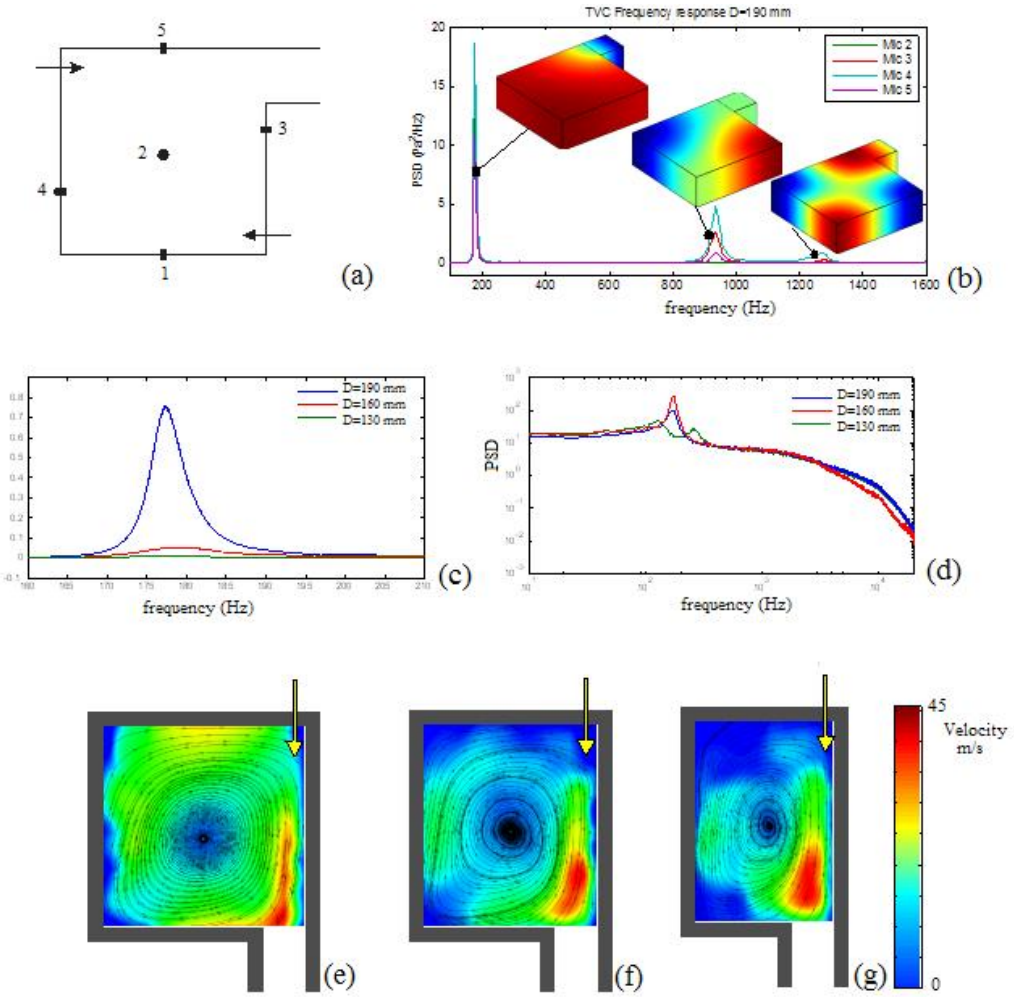


Figura 204. (a) Schema del set-up sperimentale nel quale sono messi in evidenza la posizione dei microfoni (numerati da 1 a 5) e la direzione del flusso d'aria. (b) Esempio di risultati numerico-sperimentali: power spectral density relativa ai primi tre modi acustici ottenuta mediante test sperimentale e relativa topologia del modo acustico associato prodotta per mezzo di un modello FEM. (c) e (d) andamento dello spettro in corrispondenza del primo modo acustico al variare della profondità della cavità relativo ai test acustici e ai test aeroacustici, (e), (f) e (g) campi di velocità medi ottenuti mediante la tecnica PIV relativi ai test case D=190 mm, D=160 mm e D=130 mm

Sulla base delle precedenti attività, il bruciatore sperimentale è stato realizzato (Figura 205) ed è stato installato sull'impianto MICOS (Figura 206), all'occorrenza modificato [Report RdS/2012/233] per tener conto del complesso sistema di alimentazione aria/combustibile (Figura 207).

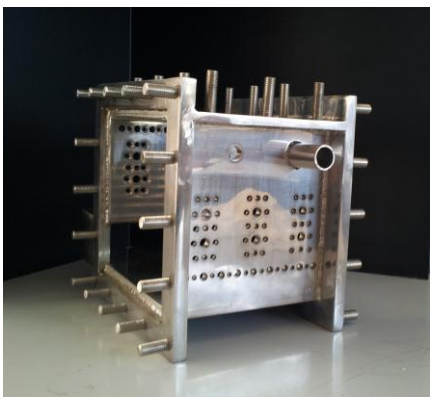


Figura 205. Prototipo di bruciatore Trapped Vortex ENEA

Figura 206. Impianto MICOS modificato. Al centro dell'immagine è visibile il modello di bruciatore TV con accessi ottici in quarzo

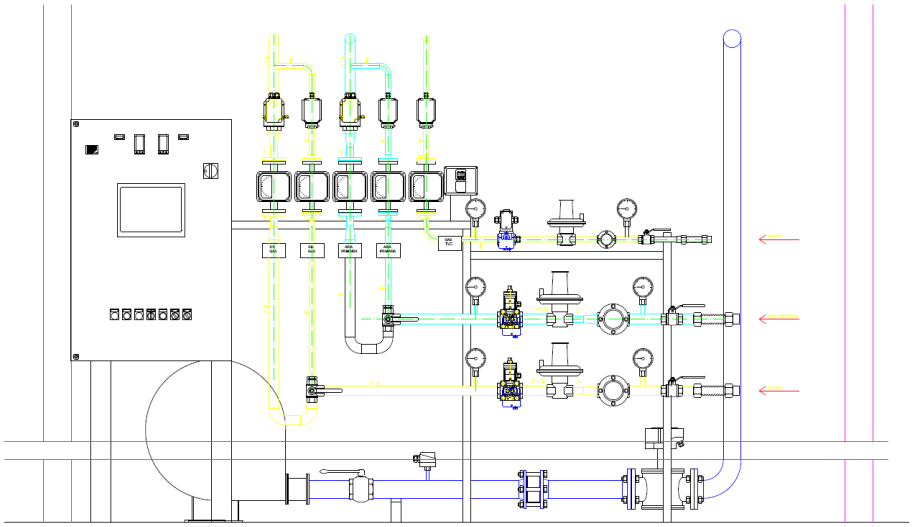


Figura 207. Schema della linee di alimentazione gas dell'impianto MICOS

A margine dell'attività teorico-sperimentale descritta, sono stati effettuati una serie di interventi H/W e S/W per l'adeguamento dell'Impianto COMET-HP di ENEA [Report RdS/2012/196**]**. L'impianto in oggetto è una facility sperimentale in grado di testare in condizioni di similitudine (pressione, preriscaldamento etc.) bruciatori di turbine a gas operanti anche con syngas provenienti dalla gassificazione del carbone. L'impiego di tale facility è prevista, nella prossima annualità, per permettere di indagare sulle fenomenologie relative alla "fuel flexibility" e ai fenomeni di instabilità che affliggono bruciatori di tipo convenzionale, allorché vengono operati con syngas.

Le modifiche H/W hanno riguardato:

1. Stabilizzare la pressione della portata dell'aria comburente e del combustibile; il combustibile di alimentazione all'impianto è fornito dalla rete di Centro ENEA Casaccia ad una pressione di circa 7 bar, mentre l'aria comburente viene prodotta da un gruppo compressori costituito da tre macchine capaci di produrre circa 700 Nm^3/h di aria alla pressione di circa 7 bar. Al fine di regolare e stabilizzare le portate del combustibile e dell'aria si è reso necessario installare sulle relative linee due riduttori di pressione in grado di regolare da 1 a 6 bar le pressioni di cui sopra.
2. Portare la camera di combustione in pressione a valori compresi tra 1 e 6 bar, tramite la realizzazione di una sezione di laminazione componibile in modo da consentire di inserire diversi orifizi con diversi diametri (35, 47, 72 mm) in corrispondenza dei tre livelli di pressione: 10, 5 e 2 bar.

Per quanto riguarda gli interventi al S/W di gestione e controllo, si è trattato di alcuni aggiornamenti in merito alla riorganizzazione dell'interfaccia operatore, la gestione di alcune procedure operative e la stima delle portate in funzione della variazione di pressione di alimentazione del combustibile e del comburente. Questi aggiornamenti e modifiche sono state effettuate, su specifiche ENEA, dalla Società *Alpha Automation Engineering* S.r.l. che ha originariamente sviluppato il sistema di Supervisione e Controllo dell'impianto COMET-HP.

B.4 Messa a punto di tecnologie numeriche per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone

Una delle tecniche più promettenti per la separazione e la cattura della CO_2 è rappresentata dalla combustione in atmosfera di ossigeno puro e gas esausti ricircolati. L'utilizzo dei gas di ricircolo è necessario al contenimento delle temperature, che risulterebbero troppo elevate nel caso di solo ossigeno. In questo modo si riesce teoricamente ad ottenere gas di scarico con concentrazioni di CO_2 dell'ordine del 95%. La tecnica suddetta può essere sfruttata per il retrofit di impianti esistenti o per i nuovi impianti da realizzare.

L'attività prevista in B.4 ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo di strumenti numerici e la messa a punto di modelli numerici per la simulazione non stazionaria di flussi multi-fase in dispositivi di combustione di interesse industriale. Tale attività è stata svolta da ENEA in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale (DIMA) dell'Università "Sapienza" di Roma ed è la prosecuzione di un'attività di R&S attivata nelle precedenti annualità dell'AdP. Per approfondire i meccanismi di interazione solido-gas, con particolare riferimento alla ossicombustione di carbone, è indispensabile disporre di codici di simulazione (di tipo LES) su infrastrutture di calcolo parallele in grado di riprodurre le fenomenologie fisico-chimiche in modo affidabile, ma anche in tempi compatibili per effettuare studi rivolti alla progettazione di combustori innovativi di interesse industriale. La R&S sui modelli numerici in questo settore, data la complessità delle fenomenologie, è in continua evoluzione, favorita dall'aumento delle capacità di calcolo rese disponibili dalle grandi infrastrutture di calcolo parallelo, come l'infrastruttura HPC ENEA CRESCO. Le attività svolte all'interno dell'AdP hanno portato ad un sostanziale sviluppo del codice ENEA HeaRT® dal punto di vista dell'accuratezza dei solutori, della modellistica LES per flussi mono e multi-fase, delle tecniche numeriche per il trattamento di geometrie complesse e di grandi dimensioni. In sintesi si sono ottenuti i risultati riportati nel seguito.

Solutori per griglie multi-livello

L'obiettivo che si intende perseguire è quello di poter affrontare la simulazione LES di domini di grandi dimensioni (tipiche in applicazioni di interesse industriale) con griglie strutturate, riducendo il più possibile il numero dei nodi di calcolo, e quindi il tempo di simulazione, ma mantenendo l'accuratezza necessaria per lo studio delle fenomenologie di interesse.

Nel corso del secondo anno di attività sullo sviluppo di tecniche di multi risoluzione LES per domini sui quali viene applicato un *mesh refinement* a più livelli di accuratezza spaziale, si è svolta un'attenta analisi sul comportamento del codice di calcolo (basato sulla formulazione delle equazioni a variabili sfalsate) al variare delle condizioni al contorno imposte; in particolare si sono confrontate le condizioni al contorno di tipo NSCBC (Navier-Stokes Characteristic Boundary Conditions) già implementate all'interno del codice, con condizioni al contorno non riflessive di tipo semplificato. Lo studio ha permesso di comprendere meglio la formulazione a variabili sfalsate, che presenta criticità sui contorni del dominio di calcolo, e ha fornito numerosi spunti per il miglioramento della tecnica multi risoluzione.

Sulla base delle prime validazioni, è stato completamente riformulato l'operatore di *restrizione* (che si occupa del trasferimento delle informazioni dalla griglia più fitta a quella più rada) per la *quantità di moto*: si è infatti passati ad una formulazione di tipo conservativo, nella quale il dominio di restrizione coincide con quello di integrazione, come già avveniva per l'operatore di restrizione delle variabili scalari. Per limitare gli effetti dannosi del trasferimento delle informazioni tra i vari livelli di griglia, inoltre, è stata prevista una zona "cuscinetto" tra il dominio di restrizione e quello di prolungamento: le informazioni della griglia più rada sono trasferite su celle *ghost* della griglia fitta, mentre la soluzione ottenuta sulla griglia fitta è trasferita solo su una porzione di dominio della griglia più lasca.

Sono state effettuate simulazioni su casi test monodimensionali che hanno fornito risultati soddisfacenti; in particolare è stato simulato l'avanzamento di onde di espansione e di compressione all'interno di condotti sia a sezione cilindrica che a sezione rettangolare, nei quali è stata inserita una griglia di calcolo a risoluzione più fitta di quella base; come è evidente dalleFigura 208 Figura 209, la soluzione calcolata con una griglia a due livelli mostra un buon accordo con quella calcolata su una griglia con un solo livello.

Un ulteriore fase di validazione è stata avviata, ma non conclusa, utilizzando la tecnica di risoluzione multi livello nella simulazione del caso test Sommerfeld & Qiu, utilizzato precedentemente per la prima validazione del modello multi fase mesoscopico (Figura 210). Tale tecnica risulta indispensabile per affrontare in tempi ragionevoli

lo studio della combustione in dispositivi quali, ad esempio, la fornace dell'impianto Fo.Sper. di IFRF (alimentato a polverino di carbone e funzionante in modalità ossi-combustione) di forma parallelepipeda, con una sezione di 2x2 m e lunga 6,25 m. La sperimentazione sull'impianto ha tra i suoi scopi principali la validazione di modelli e quindi sarebbe importante effettuare una simulazione con HeaRT per validare i suoi modelli LES. L'unico modo per poter affrontare una tale simulazione è quello di utilizzare la tecnica multi livello, riducendo il numero di nodi di calcolo nelle zone dove non è necessario avere una risoluzione spazio-temporale elevata e raffinando nelle zone di interesse per le fenomenologie di interesse.

Dato il costo computazionalmente elevato di una LES (fino ad ora si sono condotti studi RANS su questo impianto descritti più oltre) risulta importante mettere a punto tale tecnica sul codice HeaRT.

I dettagli degli sviluppi teorici e dei risultati ottenuti sono contenuti nel Report RdS/2012/198.

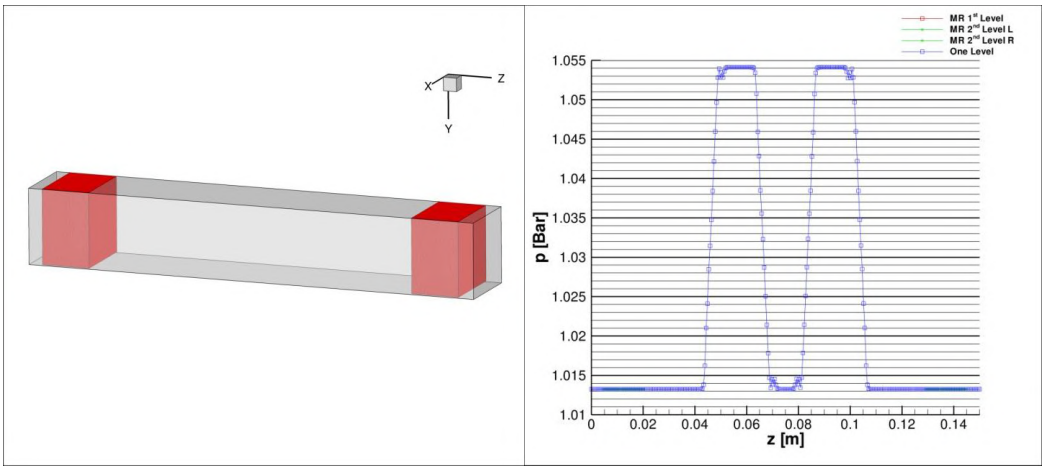


Figura 208. Griglia di calcolo per il caso test monodimensionale (a sinistra): alle estremità destra e sinistra del dominio di integrazione sono poste due zone a risoluzione maggiore (di colore rosso); le condizioni al contorno imposte sono di pareti euleriane (piani xz e yz) e uscite non riflessive (piani xy). Condizioni al contorno iniziali (a destra): due onde, una di tipo compressione-espansione, l'altra di tipo espansione-compressione, viaggiano dall'interno del campo verso le zone a risoluzione maggiore

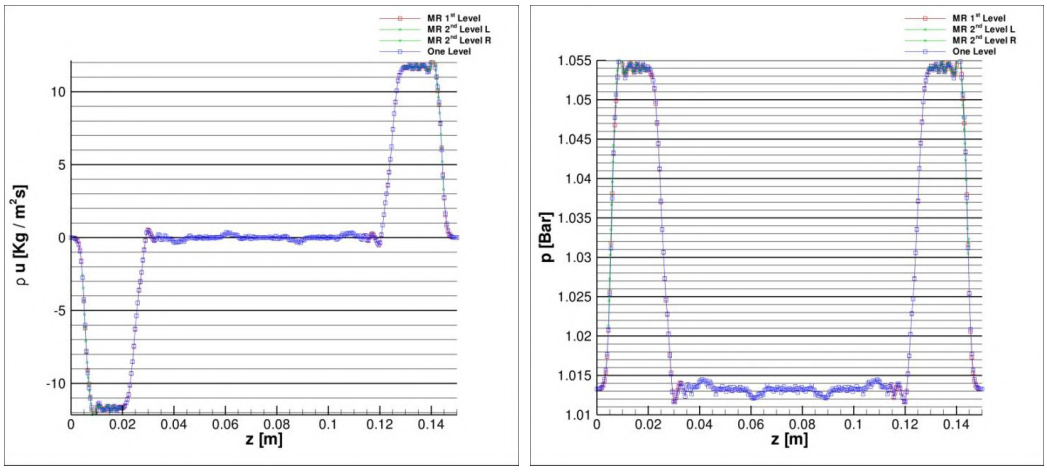


Figura 209. Quantità di moto e pressione lungo z per una simulazione effettuata con un solo livello di griglia (tratto blu) e per una simulazione con due livelli, dove con il tratto rosso è rappresentato il primo livello di griglia (rado) e con i tratti verdi i livelli più fitti; è evidente un ottimo accordo tra la soluzione calcolata utilizzando il solutore multilivello e la soluzione calcolata con un singolo livello

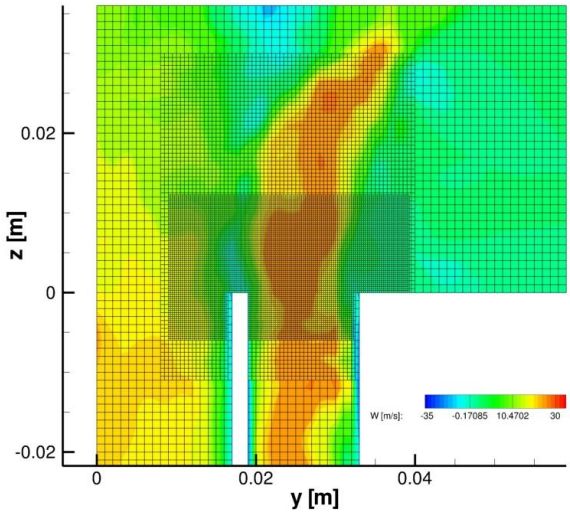


Figura 210. Campo di velocità assiale della fase gas nella simulazione del caso test multi-fase Sommerfeld e Qiu: si notano la griglia di livello 2 e la griglia di livello 3 poste in prossimità degli spigoli, dove sono più forti i gradienti e la presenza di piccoli vortici influenza notevolmente l'apertura del getto e perciò l'intero campo di moto

Validazione dei modelli per flussi multi-fase

Obiettivo di questa attività era la validazione dei moduli implementati nel codice HeaRT, nell'ambito delle precedenti annualità dell'accordo ENEA-MSE, e dediti al calcolo di flussi multifase ed in particolare alla simulazione di processi di ossicombustione del carbone. A tal fine l'attività prevedeva originariamente una prima validazione del modello di devolatilizzazione implementato su un caso ritenuto semplice dal punto di vista della struttura del flusso, tanto da poter essere simulato su una geometria monodimensionale, rappresentato da un esperimento fatto sull'impianto Isothermal Plug Flow Reactor (IPFR) dell'IFRF. Successivamente si sarebbe passati allo studio di un flusso più complesso in condizioni di ossicombustione [Report RdS/2012/199].

Nel corso dell'attività si è tuttavia preso atto che, date le condizioni operative dell'esperimento IPFR, le semplificazioni previste non avrebbero potuto essere applicate se davvero si voleva essere nelle condizioni di poter confrontare i dati sperimentali con i risultati della simulazione. Questo perché il miscelamento del getto freddo di azoto che trascina le particelle di carbone con i gas caldi presenti in camera di combustione risulta essere tutt'altro che istantaneo. Le particelle di carbone restano pertanto a contatto con una miscela fredda per un tempo non trascurabile rispetto al tempo di residenza, il che ne altera il tasso di aumento della temperatura e la quantità di massa rilasciata in funzione della distanza dall'ingresso. Un'altra criticità emersa ha riguardato l'accoppiamento del campo radiativo con la fase dispersa. É infatti emerso come il trascurare l'effetto dell'irraggiamento sul tasso di riscaldamento delle particelle di carbone potesse portare ad un sensibile ritardo sul tempo di rilascio di massa. É stata pertanto messa a punto ed implementata una metodologia per l'accoppiamento del campo radiativo e di quello della fase dispersa.

A questo punto l'esperimento è stato simulato su un dominio tridimensionale. Data la maggiore complessità del caso rispetto a quanto preventivato ed al maggiore costo computazionale richiesto, il piano originale di lavoro è stato necessariamente modificato e la simulazione è stata effettuata per una sola dimensione di particelle (70 µm) utilizzando i meccanismi di devolatilizzazione completo e ridotto.

L'obiettivo complessivo di ottenere una validazione del modello completo su una configurazione di interesse è da ritenersi tuttavia ottenuto. A supporto di questa affermazione, in Figura 211, si riportano le immagini della sezione di un campo istantaneo di temperatura della fase gas, della frazione massica del CO rilasciato dal carbone, del carbone di riferimento, inizialmente maggiormente presente nel surrogato utilizzato, e della frazione volumetrica della fase dispersa. In Figura 212**,** si riporta il confronto tra i dati sperimentali della conversione del carbone ed i risultati ottenuti simulando la devolatilizzazione con il modello completo.

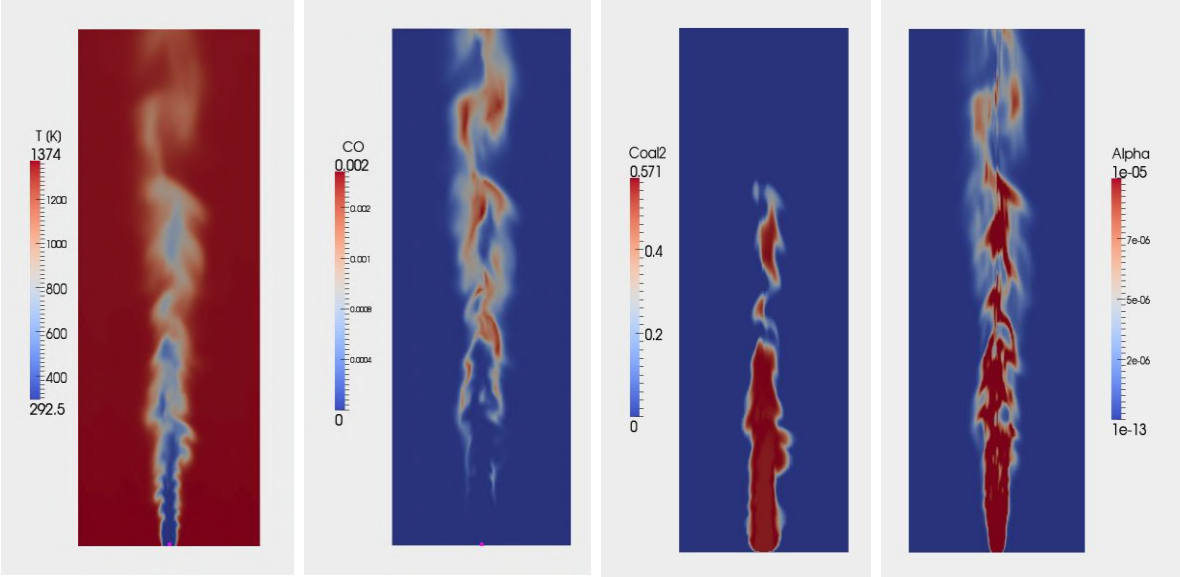


Figura 211. Campo istantaneo della temperatura della fase gas (a), della frazione massica del CO rilasciato dal carbone (b), del carbone di riferimento (c) inizialmente maggiormente presente nel surrogato utilizzato, e della frazione volumetrica della fase dispersa (d)

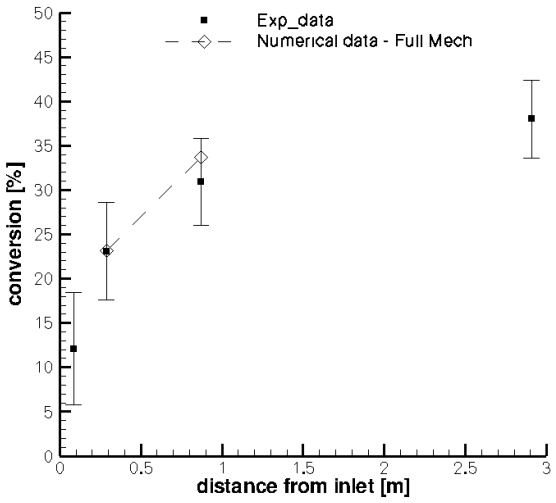


Figura 212. Confronto tra i dati sperimentali della conversione del carbone ed i risultati ottenuti simulando la devolatilizzazione con il modello completo

*Simulazione di geometrie complesse in flussi reattivi tramite la tecnica Immersed Volume Method (IVM)*In questa annualità, la tecnica IVM è stata applicata e validata simulando casi reali ad alti numeri di Reynolds di flussi reattivi e non [Report RdS/2012/197]. A fronte dei risultati ottenuti dalle prime simulazioni, il modello è stato migliorato per poter trattare casi con un accuratezza spaziale anche superiore al secondo ordine ed è stata, inoltre, introdotta una tecnica di tipo *Moving Least Square* per poter valutare in maniera più esatta i gradienti di grandezze quali temperatura, entalpia e specie chimiche necessari nel calcolo di flussi diffusivi nel caso di combustione turbolenta. Un ulteriore miglioramento nell'accuratezza della soluzione si è ottenuto implementando procedure di cubatura per il calcolo ad alto ordine dei flussi nelle equazioni di Navier Stokes attraverso solutori di *Riemann* (*AUSM*). Nelle Figura 213Figura 214 si riportano le immagini di campi istantanei relativi a due simulazioni effettuate su flussi reattivi in geometrie significative per la validazione della tecnica (flusso reattivo attorno ad un cubo solido, e flusso turbolento attorno ad una sfera con supporto.

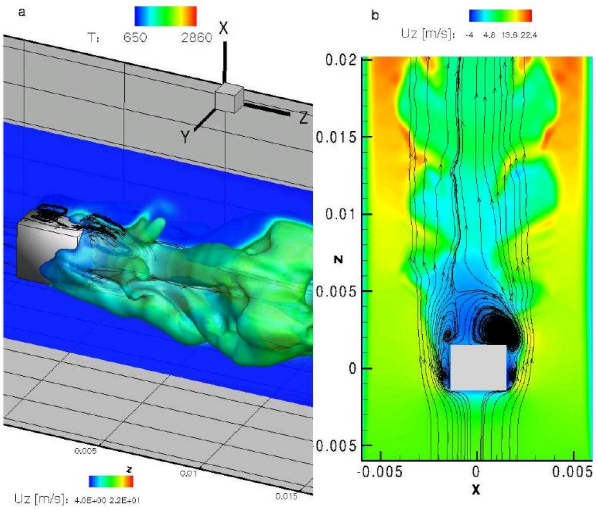


Figura 213. Fiamma premiscelata a Re=3200 attorno ad un cubo solido: a) Piano su cui è riportata la Isosuperficie della temperature (1500K) colorata con la velocità assiale b) Campo istantaneo della velocità assiale e linee di corrente su un piano XZ

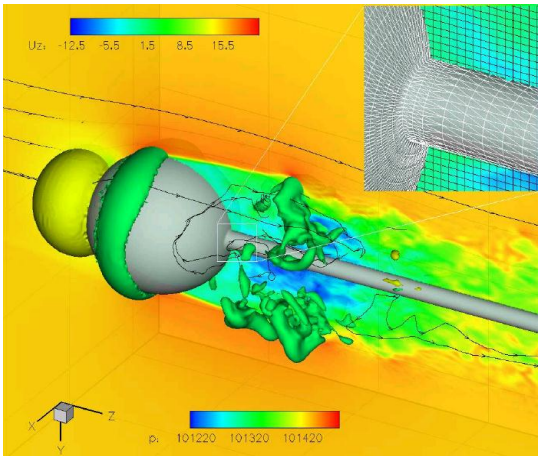


Figura 214. Flusso turbolento (Re=51500) attorno ad una sfera solida con supporto. Velocità assiale istantanea; isosuperfici della pressione (101317 Pa e 101409 Pa). Zoom: STL della superficie solida (linee bianche) e griglia di simulazione (linee nere).

Simulazioni RANS sulla fornace dell'impianto Fo.Sper. di IFRF

Con lo scopo di approfondire lo studio della tecnologia di combustione del polverino di carbone in aria o ossigeno, e di rendere disponibili dati sperimentali per validare i modelli numerici, l'IFRF ha realizzato un impianto sperimentale chiamato Fo.Sper. installato presso gli impianti ENEL di Livorno, equipaggiato con un bruciatore TEA-3C (Figura 215) in grado di operare sia in modalità oxy+flue gas che in aria, e alimentato a gas o polverino di carbone. In questo impianto i gas esausti vengono estratti, raffreddati, condensati ed in parte rispediti in camera di combustione, dopo essere stati preriscaldati ed arricchiti in ossigeno.

I risultati ottenuti da una prima serie di simulazioni CFD di tipo RANS portate avanti presso i laboratori di termofluidodinamica computazionale dell'ENEA sono illustrati nel Report RdS/2012/202.

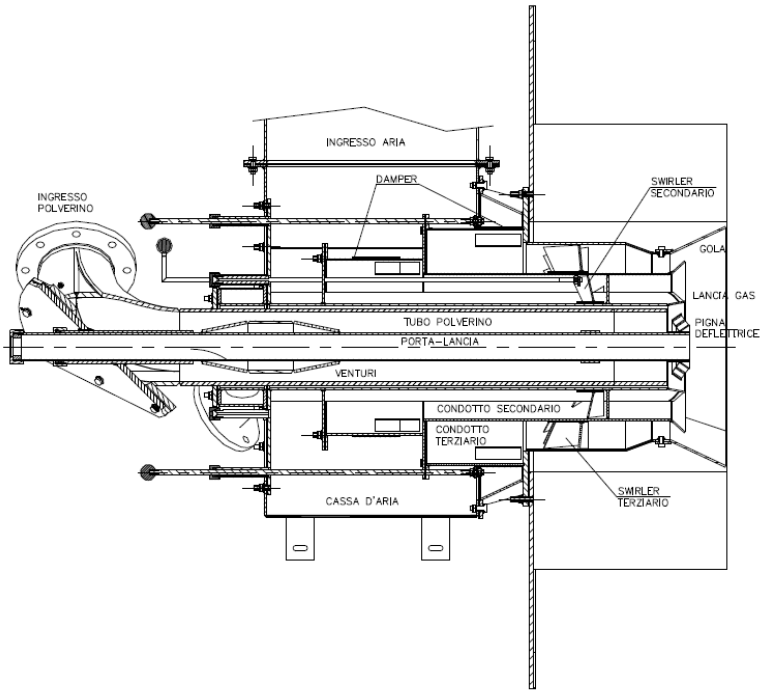


Figura 215. Sezione trasversale del bruciatore

La mesh utilizzata per il calcolo è una mesh ibrida, tetraedrica nella parte interna al bruciatore e prismatica (in parte a base triangolare in parte a base quadrilatera) nella camera di combustione. Si è sfruttata a questo proposito la periodicità del problema, limitandosi allo studio di un solo quarto dell'intero apparato. La simulazione è del tipo RANS ed il modello di turbolenza adottato il k-ε. Il modello EDC (Eddy Dissipation Concept)[12] è stato adottato per la modellazione dei fenomeni chimici in fase gas. Per l'irraggiamento si è scelto il modello P1. Dai dati a disposizione, ottenuti in campagne sperimentali condotte nella precedente annualità del Progetto, è stata altresì estrapolata la distribuzione di temperatura sulle pareti . La traiettoria e lo scambio termico e di massa con la fase gas delle particelle è stata valutata secondo un approccio lagrangiano.

Per la distribuzione granulometrica effettiva è stata ipotizzata una distribuzione Rosin-Rammler, con diametro medio 60 µm e spread factor di 1,08, che descrive abbastanza accuratamente la curva reale. Il fenomeno di rilascio volatili è stato modellato con il CPD (Chemical Percolation Devolatilization) model[13-14]. Le specie volatili sono state rappresentate con un'unica pseudo molecola del tipo $C_xH_yO_z$, che si decompone in fase gas attraverso una reazione infinitamente veloce in:

$$C_xH_yO_z \longrightarrow Tar + CH_4 + CO + CO_2$$

L'interazione turbolenza-chimica in fase gas, è stata trattata attraverso il modello EDC, il quale immagina di suddividere il dominio nelle cosiddette "fine structures", corrispondenti alle celle computazionali.

Le simulazioni realizzate sono relative alla modalità di funzionamento Oxy.

In Figura 216 sono riportate le traiettorie delle particelle di carbone che evidenziano la presenza dello swirl, cioè della componente rotatoria tangenziale sulle particelle stesse. Tale swirl fa in modo che le particelle abbiano, almeno nella prima parte del loro percorso, un moto elicoidale all'interno della camera di combustione. L'effetto dello swirl è, tra gli altri, anche quello di determinare un aumento del tempo di permanenza delle particelle di carbone in prossimità della zona di immissione. Questo, unitamente al fatto che le dimensioni delle particelle sono contenute (valor medio 60 µm), fa si che il processo di devolatilizzazione inizi e sostanzialmente si esaurisca in prossimità dell'immissione delle particelle stesse, come si può vedere dalla Figura 217. Nella Figura 218 è riportato il campo delle temperature.

---

[12] B. Magnussen, Modeling of NOx and soot formation by the Eddy Dissipation Concept. Int. Flame Research Foundation, Jan 1989

[13] D. Grant, R. Pugmire, T. Fletcher,and A. Kerstein. Energy & Fuels, 3(2) 1989, 175–186

[14] T. H. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire and D. M. Grant. Energy & Fuels, 4(1) 1990. 54–60
T. H. Fletcher, A. R. Kerstein, R. J. Pugmire, M. S. Solum, and D. M. Grant. Energy & Fuels , 6(4) 1992,414–431

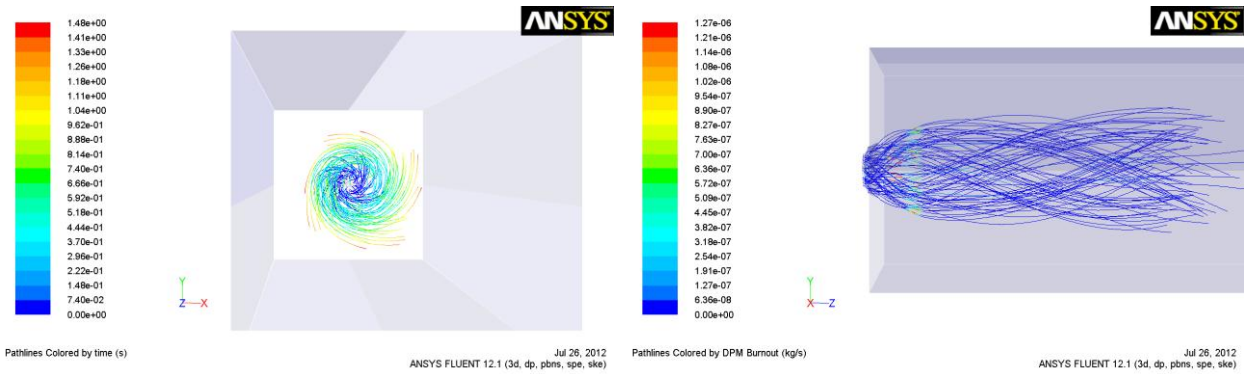


Figura 216.Traiettotia particelle di carbone vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)

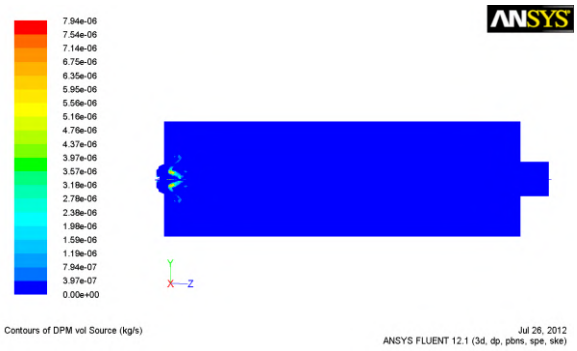


Figura 217. Specie volatili

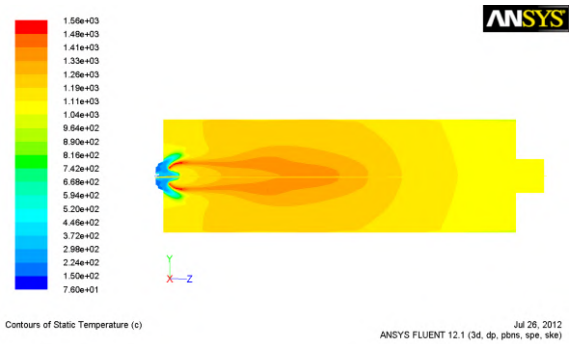


Figura 218. Campo di temperatura

La fornace dell'impianto Fo.Sper. è di forma parallelepipeda, con una sezione di 2x2 m ed è lunga 6,25 m. È dotato di 14 porte, disposte lungo l'asse principale a varie distanze a partire dalla testa del bruciatore (Tabella 39. Posizione delle finestre di misura).

Tabella 39. Posizione delle finestre di misura

Port	1	2	3	4	5	6	7	S	9	10	11	12	13	14
Distance from the biirner (nun)	170	460	750	1040	1330	1620	2070	2660	3250	3840	4430	5020	5610	6200

Riportiamo, a titolo di esempio, (Figura 219) l'andamento della temperatura simulata (rosso), comparata con i risultati sperimentali (blu), nelle varie porte (PORT x).

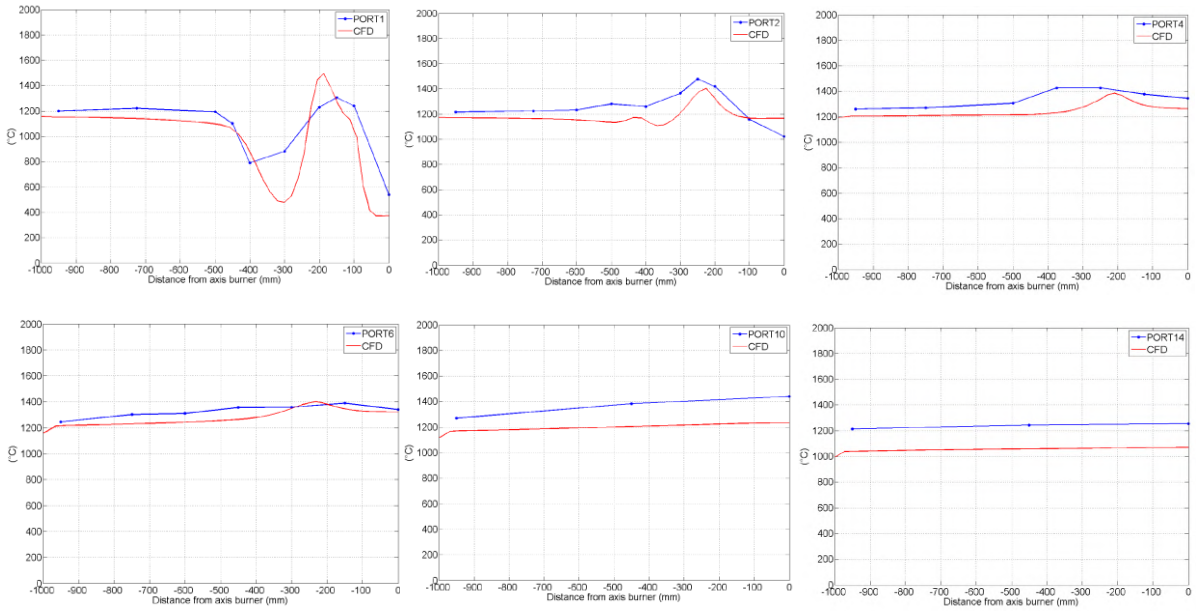


Figura 219. Andamento della temperatura nelle porte 1,2,4,6,10 e 14

Possiamo vedere che, per quanto riguarda la temperatura, l'accordo è abbastanza soddisfacente, tenendo conto che lo schema cinetico utilizzato è molto semplificato.

La modellazione della combustione del carbone, coinvolgendo reazioni che avvengono in fase eterogenea, presenta degli aspetti critici in più rispetto alla combustione omogenea gas-gas. Sono state fatte quindi delle semplificazioni sia dal punto di vista modellistico, sia dal punto di vista geometrico nella parte che riguarda l'ugello di immissione del polverino di carbone in camera di combustione. I primi risultati ottenuti sono comunque incoraggianti, mostrando che le ipotesi fatte vanno nella direzione giusta. L'attività prosegue ed attualmente l'aspetto modellistico è in fase di affinamento.

Nell'ambito del sotto obiettivo B.4 una menzione particolare merita l'attività relativa allo sviluppo di modellistica cinetica della combustione di carbone. Questa attività è stata oggetto di collaborazione con il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica del Politecnico di Milano.

Nei due anni precedenti l'attività del Politecnico ha avuto per oggetto lo sviluppo di modellistica cinetica legata alla volatilizzazione del carbone, al rilascio di composti solforati e azotati, nonché alla ossidazione in fase gas. Oggetto della presente collaborazione è la modellazione della cinetica di ossidazione del char da carbone [Report RdS/2012/271].

Durante la combustione di particelle di carbone sono coinvolti diversi processi di natura cinetica, come la pirolisi o volatilizzazione, le reazioni di pirolisi secondaria dei prodotti volatili e le reazioni eterogenee tra il solido residuo e le specie gasificanti.

L'obiettivo della collaborazione è la realizzazione di un modello cinetico multi-step abile a caratterizzare il chimismo e la reattività del char, in grado di considerare sia la variabilità morfologica dei differenti char sia la variabilità di composizione. La reattività del char è influenzata non solo dalla natura del carbone (rango) ma anche dal processo di pirolisi che condizionano la morfologia del residuo solido (area superficiale, porosità) e la composizione elementare.

Un modello cinetico di pirolisi multi-step è stato sviluppato per la predizione della composizione elementare del char in diverse condizioni non solo di pirolisi ma anche di tipologia di carbone. Le predizioni del modello sono state confrontate con alcuni dati sperimentali di letteratura ottenuti in diverse condizioni operative (rango del carbone, temperature, velocità di riscaldamento, reattori). Il confronto generale mostra un buon accordo tra il modello ed il dato sperimentale.

Parallelamente al modello cinetico di pirolisi è stato proposto un modello di *annealing*, che permette di descrivere il processo di invecchiamento del char residuo a seguito di trattamenti termici più spinti.

Durante le reazioni eterogenee, le proprietà morfologiche del char cambiano con la conversione. E' stato utilizzato un particolare modello di predizione dell'evoluzione dell'area superficiale durante la conversione del char denominato Random Pore Model. Gli input di questo modello sono alcuni parametri morfologici, i quali vengono stimati sulla base di alcune correlazioni empiriche sviluppate all'interno di questa attività utilizzando dati presenti in letteratura.

Il modello cinetico di ossidazione del char sviluppato proposto in questo lavoro è in grado di descrivere le reazioni di adsorbimento delle specie gassose sui siti attivi, l'interazione delle specie ossigenate superficiali con le specie gassose e le reazioni di deadsorbimento. Il modello include 16 reazioni e 12 specie: 3 macro-specie solide ($CHAR_H$, $CHAR_C$, $CHAR_G$), 4 specie gassose (O_2, CO_2, CO, H_2O) e 5 specie adsorbite [C(O), $C(O_2)$, $C(O)_G$, $C(O_2)_G$, C(OH)]. Il meccanismo generale di conversione del char è ottenuto come combinazione lineare dei tre sottomodelli cinetici, uno per ciascuna macro-specie solida.

I confronti con i dati sperimentali evidenziano una buona capacità del modello di predire il comportamento sperimentale del char, in diverse condizioni di temperatura, velocità di riscaldamento, di pirolisi e di concentrazione di ossigeno.

C. Tecnologie di sequestro e utilizzo della CO_2 e progettazione di un impianto dimostrativo completo

L'obiettivo C prevede:

- *Studi sulle tecnologie di sintesi di combustibili gassosi dalla CO_2.* L'obiettivo riguarda studi sperimentali relativi alla sintesi di combustibili gassosi da CO_2 e lo studio cinetico e termodinamico della reazione di meta nazione;
- *Studi su tecnologie di fissaggio della CO_2 con metodi chimici*. L'obiettivo riguarda lo studio della termodinamica e cinetica del processo di carbonatazione di ceneri (fly-ash) e rifiuti industriali alcalini, per l'efficientamento del processo stesso;
- *Attività progettuale per l'ottimizzazione di un impianto dimostrativo che preveda la cattura ed il sequestro della CO_2 in sito idoneo.* L'obiettivo prevede l'approfondimento tecnico-economico, degli aspetti di cattura, trasporto e storage con particolare riferimento alla ottimizzazione e successiva sperimentazione di una rete di monitoraggio geochimica nel bacino del Sulcis.

C.1 Studi sulle tecnologie di sintesi di combustibili gassosi dalla CO_2

L'attività svolta da ENEA nelle precedenti annualità ha permesso di acquisire le informazioni di base sulla reazione di "metanazione", essendo stata studiata la reazione dal punto di vista termodinamico ed avendo condotto una prima serie di prove sperimentali. In vista della applicazione di questa reazione in un impianto, anche solo in scala dimostrativa, è stata condotta un'analisi della risposta del catalizzatore a lunghi tempi di esercizio e la valutazione della sua sensibilità alla presenza di inquinanti nella miscela di alimentazione. Per poter, infine, operare con quantità apprezzabili di CO_2 è stato disegnato ed avviata la costruzione di un impianto da laboratorio che potrà lavorare fino alla pressione di 20 bar.

Il catalizzatore, costituito da polvere di nichel su lana di roccia, è stato lasciato in esercizio, sotto alimentazione di una miscela CO_2/H_2 (20/80) alla temperatura di 280 °C, per un tempo pari a 180 ore. Come riportato nella Figura 220 si nota un iniziale debole abbassamento della efficienza di conversione CO_2/CH_4 (Y), seguito da una sostanziale costanza nell'efficienza fino a 150 ore, per infine degradare piuttosto velocemente.

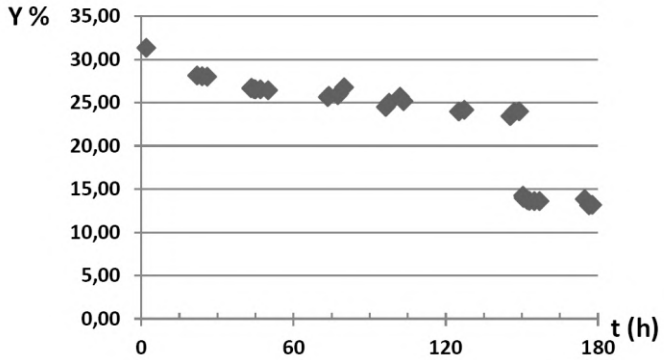


Figura 220. Andamento dell'efficienza di conversione CO_2/CH_4 (Y) nel tempo

La risposta alla presenza di H_2S, scelto come inquinante tipo, ha evidenziato una forte sensibilità del catalizzatore per questo gas. Infatti alimentando con un flusso di 50 sccm (standard cubic centimeters per minute) di H_2S al 2% in N_2, alla temperatura di 280 °C, si ha una notevole perdita di efficienza di conversione già dopo 0,5 h, quando il catalizzatore è costituito da 0,2 g di Ni. In queste condizioni si ha la completa inattivazione del catalizzatore dopo 4 ore.

Sul catalizzatore trattato con miscele contenenti H_2S sono state eseguite misure XRD per valutare la natura dell'effetto di avvelenamento: sulla superficie del catalizzatore sono state individuate fasi solide costitute da solfuri di nichel quali Ni_3S_2 ed NiS.

E' stata infine verificata la efficacia del trattamento di attivazione e rigenerazione del catalizzatore quando viene trattato con H_2. Il trattamento in idrogeno è comunemente praticato per attivare, prima del suo uso, un catalizzatore di nichel. L'attivazione in H_2 ha lo scopo di rendere accessibili i siti attivi sulla superficie, liberandola da strati di materiale ossidato. A seguito del trattamento in H_2, il catalizzatore quasi raddoppia la sua iniziale efficienza di conversione. E' stato inoltre osservato che se la diminuzione della efficienza di conversione è dovuta semplicemente all'uso del catalizzatore per lunghi periodi, il trattamento in H_2 ripristina la efficienza iniziale.

Quando invece la perdita di efficienza di conversione è dovuta alla presenza di H_2S nella miscela di alimentazione, il trattamento in H_2 non è in grado di ripristinare le condizioni iniziali.

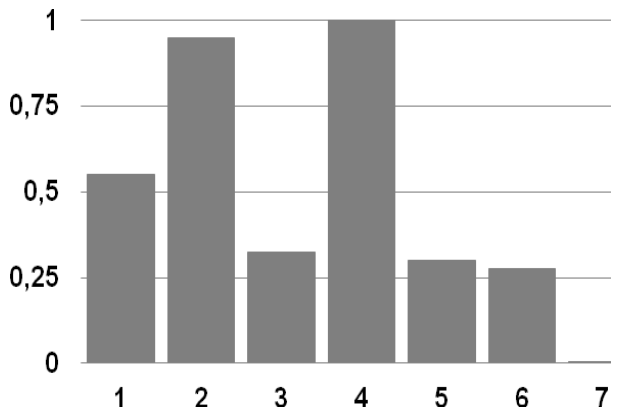


Figura 221. Resa relativa in funzione dei vari trattamenti cui il catalizzatore è sottoposto: 1) così come preparato; 2) dopo attivazione in H_2; 3) dopo 22h di lavoro; 4) dopo rigenerazione in H_2 ; 5) dopo 30' di avvelenamento con H_2S; 6) dopo rigenerazione in H_2; 7) dopo 4 h di avvelenamento in H_2S

Le considerazioni finora svolte sono riassunte schematicamente nella Figura 221 che mostra l'andamento della resa relativa in metano (rispetto al suo valore massimo) in funzione dei vari trattamenti cui il catalizzatore è stato sottoposto.

Concludiamo quindi che l'invecchiamento del catalizzatore è un processo reversibile, mentre l'avvelenamento è irreversibile. L'effetto dell'invecchiamento è dovuto alla formazione di materiale carbonioso sulla superficie del catalizzatore che con il trattamento in H_2 viene rimosso; l'effetto dell'avvelenamento è dovuto alla formazione di solfuri di nichel che risultano insensibili all'idrogeno; risulta pertanto necessaria una fase di pretrattamento della corrente concentrata di CO_2 per assicurane la purezza.

I risultati di questa attività sono descritti nel Report RdS/2012/203.

C.2 Studi su tecnologie di fissaggio della CO_2 con metodi chimici

Le attività svolte nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Università di Roma Tor Vergata (UTV), Dipartimento di Ingegneria Civile, hanno riguardato la caratterizzazione dei residui provenienti da impianti di gassificazione di carbone [Report RdS/2012/204]. In particolare, in attesa della disponibilità di residui provenienti dall'impianto dimostrativo Zecomix, sono state investigate le caratteristiche di residui provenienti dall'impianto pilota di gassificazione a letto fisso di Sotacarbo.

Sulla base delle caratteristiche chimiche, fisiche ed ambientali dei residui stessi, sono state effettuate valutazioni sulle diverse opzioni potenziali di riutilizzo, alcune delle quali sono state testate mediante prove di laboratorio. Lo studio sperimentale è stato preceduto da uno studio di letteratura, finalizzato ad identificare le potenziali opzioni di riutilizzo delle scorie di gassificazione. Tale studio ha consentito di evidenziare che le caratteristiche dei residui, e le conseguenti opzioni di riutilizzo, dipendono fortemente dalla tecnica di gassificazione (letto fisso, letto trascinato, letto fluido), dalle condizioni operative applicate e dal tipo di carbone utilizzato. Inoltre, trattandosi di materiali tipicamente eterogenei, sia per dimensione che per caratteristiche chimico-fisiche, è prassi comune procedere ad una separazione dei residui in diverse frazioni maggiormente omogenee.

Il campione di scorie analizzato, ottenuto da un test di gassificazione svolto sull'impianto pilota Sotacarbo a letto fisso (tipo Wellman - Galusha) utilizzando carbone del Sulcis, è stato suddiviso in tre frazioni granulometriche (grossolana, intermedia e fine). La frazione grossolana è stata inoltre suddivisa in quattro frazioni, con diverse caratteristiche. La tabella seguente riporta l'abbondanza relativa delle frazioni, il contenuto di carbonio organico (TOC) e inorganico (IC) ed il pH.

Frazioni granulometriche	ϕ [mm]	% (sul totale)	% (F. Grossolana)	TOC* [%]	IC** [%]	pH
Frazione grossolana	d>=4	66,54				
Clinker			75,74	1,66	0,0029	9,36
Carbone			9,31	47,44	0	6,95
Frazione "rossa"			7,53	1,47	0	10,26
frazione "bianca"			7,42	1,73	0	7,58
Frazione intermedia	0,25<=d<=1,18	20,35		8,02	0,022	11,11
Frazione fine ("cenere")	d<0,25	13,11		3,12	0,11	12,34

*TOC: Total Organic Carbon

**IC: Inorganic Carbon

Il clinker, che da solo rappresenta il 50% in peso del campione di residui, sottoposto ad analisi XRD ed elementare, è risultato costituito da silico-alluminati ed è risultato rispettare i limiti previsti per il riutilizzo in procedura semplificata in relazione a quanto previsto per il test di cessione. Le caratteristiche di questa frazione la rendono potenzialmente idonea all'impiego come aggregato leggero, previa sinterizzazione. Il carbone, che costituisce circa il 6% in peso del campione di residui, potrebbe essere riciclato all'impianto di gassificazione. Considerate le loro caratteristiche, per entrambe queste frazioni non ha senso prevedere l'utilizzo in processi di carbonatazione e granulazione, che erano stati potenzialmente individuate nell'allegato tecnico all'accordo di collaborazione.

Considerato il valore elevato di pH, la frazione fine ("cenere") è stata invece valutata di potenziale interesse per il riutilizzo in processi di carbonatazione. Inoltre, vista la dimensione granulometrica inferiore a 250 µm, tale frazione è stata considerata anche di interesse per un processo di granulazione finalizzato alla produzione di aggregati. Tali opzioni sono state valutate mediante test sperimentali di carbonatazione e granulazione. I test di carbonatazione, condotti a condizioni operative già sperimentate su scorie di acciaieria in precedenti accordi di collaborazione ENEA-UTV (T=50 °C, rapporto L/S=0,2 kg/kg), hanno evidenziato rese molto limitate, con uptake di anidride carbonica inferiori all'1%. Si può pertanto concludere che il riutilizzo in processi di carbonatazione non sia di interesse. Al contrario, prove di granulazione condotte sulle ceneri, utilizzando cemento come legante (40% in peso della miscela), hanno dimostrato la possibilità di ottenere un materiale di dimensione granulometrica di potenziale interesse come aggregato.

In conclusione, i risultati ottenuti, sebbene limitati ad un campione rappresentativo di una sola tipologia di gassificatore (a letto fisso), hanno consentito di evidenziare i seguenti punti:

- il potenziale riutilizzo dei residui di gassificazione richiede una preventiva classificazione (quanto meno dimensionale), che consenta di individuare frazioni omogenee;
- la frazione grossolana, in prevalenza costituita da clinker (silico-alluminati) può essere sottoposta a sinterizzazione per la produzione di aggregati leggeri; la frazione carboniosa può essere invece ricircolata all'impianto di gassificazione;
- la frazione fine (cenere) può essere sottoposta a processi di granulazione per la produzione di aggregati;
- la frazione intermedia non può essere utilizzata tal quale, ma richiede eventuali ulteriori step di separazione, eventualmente sfruttando la diversa densità delle componenti presenti.

C.3 Ottimizzazione progettuale di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 mediate ECBM ed iniezione in acquiferi salini

L'applicazione della cattura della CO_2 ad impianti di produzione elettrica rappresenta un processo emergente che, come tutti i sistemi non ancora tecnologicamente e commercialmente maturi, presenta numerose incertezze sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista economico. Una condizione, questa, accentuata dalla recente crisi finanziaria che ha colpito tutti i Paesi.

Gli scenari energetici elaborati negli ultimi anni hanno evidenziato il ruolo importante delle tecnologie CCS nella riduzione delle emissioni di CO_2 e, quindi, nel processo di mitigazione dei cambiamenti climatici. Nel Report "Energy Technology Perspectives" del 2010 l'IEA prevede che entro il 2050 circa il 10% di riduzione delle emissioni di anidride carbonica sarà dovuto all'introduzione delle CCS nel settore della power generation.

L'ENEA, nell'ambito del presente obiettivo, ha svolto uno studio relativo alla valutazione tecnico-economica dell'applicazione delle tecnologie CCS ad impianti termoelettrici a carbone [Report RdS/2012/205]. Questa analisi si pone l'obiettivo di illustrare i costi associati all'applicazione di tali tecnologie ad impianti termoelettrici a carbone, con riferimento alle metodologie proposte dai principali Istituti internazionali che hanno pubblicato nell'ultimo triennio dati di costo e performance operative. In particolare è stato effettuato un confronto tra

impianti Ultra Super Critici ed impianti di gassificazione integrata sotto opportune condizioni al contorno, utilizzando come parametri di valutazione il costo dell'elettricità e il costo della CO_2 evitata.

I costi presentati in questo studio hanno una natura "generica" e non rappresentano i costi di progetti specifici che possono variare notevolmente in base a fattori site-specific come, per esempio, la presenza di particolari forme di regolamentazione ambientale, presenza di un mercato delle emissioni, incentivi finanziari e livello di rischio, ecc..

L'analisi illustra, in una prima fase, il background ed il quadro generale entro cui i sistemi CCS iniziano a muoversi: la crescente attenzione agli aspetti di sostenibilità ambientale è un driver molto forte all'impiego di risorse fossili in modo "pulito" ed orientato ad un futuro di zero emission. Successivamente vengono analizzati impianti termoelettrici a carbone e i sistemi di CCS dal punto di vista strettamente tecnologico, evidenziando quali sono le criticità che dovranno essere affrontate e risolte per l'ottenimento di prestazioni sempre migliori.

Nel lavoro ci si sofferma poi su una panoramica orientata agli aspetti normativi relativi alle emissioni di CO_2 ed allo stoccaggio; l'introduzione delle tecnologie di cattura della CO_2, infatti, non può prescindere dai vincoli normativi esistenti oggi in Italia. Vengono sintetizzate e confrontate le metodologie applicate da quattro tra i più importanti Istituti internazionali di politica energetica nelle determinazione dei costi dei sistemi CCS: il NETL-DOE, il GCCSI, la piattaforma ZEP e l'IEA.

Lo studio propone infine una metodologia di valutazione dei costi di cattura della CO_2 prendendo come input alcuni dati estrapolati dalle Organizzazioni sopracitate e facendo alcune considerazioni relative ai vincoli normativi che si prevede possano entrare in vigore. Viene inoltre effettuata un'analisi probabilistica ricorrendo al cosiddetto metodo Monte Carlo che consente di associare ad ogni parametro in input del modello adottato non un valore deterministico ben preciso bensì un'opportuna distribuzione di probabilità. In questo modo, risulta possibile caratterizzare l'incertezza e la variabilità legata ai parametri in output considerati (COE e MC).

Questo lavoro si inserisce tra le attività condotte da ENEA nell'ambito del programma Ricerca di Sistema Elettrico finalizzate alla riduzione del costo dell'energia elettrica, al miglioramento dell'affidabilità del sistema e della qualità del servizio, alla riduzione dell'impatto sull'ambiente e all'utilizzo razionale delle risorse energetiche del Paese. In particolare, gli studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e sulle tecnologie CCS si pongono come obiettivo la realizzazione di impianti dimostrativi che contribuiscano al superamento delle principali problematiche legate all'applicazione della cattura della CO_2 agli impianti (penalizzazione in termini di costo e di rendimento).

Le attività in quest'area di ricerca hanno portato, tra i vari risultati, alla progettazione e alla realizzazione, presso il centro della Casaccia, di una infrastruttura sperimentale denominata Zecomix che, assieme a quella realizzata presso la Sotacarbo in Sardegna, è stata approvata per l'inserimento nella roadmap italiana delle infrastrutture di ricerca (IR) di interesse pan-europeo. Un altro filone di ricerca si è focalizzato sulla sperimentazione e dimostrazione di sistemi e componenti per un impianto integrato di generazione elettrica da carbone con cattura e sequestro della CO_2 in bacini carboniferi profondi; a tal fine sono stati utilizzati, e adeguati, gli impianti del Centro Ricerche SOTACARBO, detentrice della piattaforma sperimentale di gassificazione del carbone nel bacino carbonifero del Sulcis.

Di seguito si riportano sinteticamente i parametri economici principali (costo dell'elettricità e costo di mitigazione) calcolati per le due tipologie impiantistiche maggiormente utilizzate nella generazione a carbone:

- USC: impianto Ultra Super Critico, a polverino di carbone
- IGCC: impianto a ciclo combinato abbinato ad un sistema di gassificazione di carbone che produce syngas usato come combustibile della turbina a gas

in assenza e in presenza di cattura della CO_2. Si rimanda alla lettura del Report RdS/2012/205 per una trattazione più approfondita e per altre considerazioni sulle assunzioni e sulla metodologia applicata.

I calcoli sono stati effettuati assumendo un costo medio e alto del carbone ed ipotizzando anche un'eventuale tassazione delle emissioni di CO_2 in base alla futura normativa.

In assenza di tassazione e con un costo medio del carbone, il COE di un USC con cattura è pari a 0,0749 €/kWh (+ 52% rispetto al caso base, senza cattura) mentre il COE di un IGCC si attesta sui 0,0806 €/kWh (+ 33% circa rispetto alla configurazione base). Il costo di mitigazione, invece, nel primo caso è pari a 41,8 €/t CO_2, mentre nel secondo caso è pari a 30 €/t CO_2.

Se fosse applicata una tassazione di 30 €/t CO_2 emessa, il COE di un USC con cattura sarebbe di 0,0777 €/kWh, mentre il COE di un impianto con gassificazione sarebbe pari a 0,0833 €/kWh (+ 4 circa rispetto la caso senza tassazione, per entrambe le tecnologie). In questo caso, il costo della CO_2 evitata per un USC verrebbe abbattuto del 70% (pari a poco più di 12 €/t CO_2 in valore assoluto), mentre per un IGCC questa voce di costo sarebbe

addirittura negativa (-0,03 €/t CO_2), sottolineando il raggiungimento (ed il superamento) del punto di pareggio per cui conviene investire nell'applicazione della CCS piuttosto che pagare un'imposta.

Considerando un costo alto del combustibile, il COE di un USC con cattura sarebbe pari a 0,0808 €/kWh, contro un COE di 0,0864 €/kWh di un IGCC. Il costo della CO_2 evitata sarebbe, rispettivamente, di 44 e 32 €/t CO_2. In assenza di sistemi di cattura il COE di un USC sarebbe pari a 0,0536 €/kWh, mentre il COE di un IGCC si attesterebbe su 0,065 €/kWh.

Ipotizzando la presenza di un imposta sulla CO_2 emessa, il COE di un USC con cattura sarebbe di 0,0836 €/kWh (con un lieve incremento del 3,5% rispetto al caso che non prevede una tassazione) mentre il COE di un IGCC con cattura sarebbe pari a 0,089 €/kWh (+ 3% circa rispetto all'assenza di una tassazione). In questo caso il costo di mitigazione sarebbe pari a 14,7 €/t CO_2 per un USC e 2 €/t CO_2.

Le tabelle 40-43 illustrano sinteticamente i risultati.

Tabella 40.Costo medio del combustibile e assenza di tassazione

		USC	IGCC
COE (€/kWh)	senza CCS	0,0493	0,0607
	con CCS	0,0749	0,0806
	% aumento	52%	33%
MC (€/tCO_2)		41,82	30

Tabella 41. Costo alto del combustibile e assenza di tassazione

		USC	IGCC
COE (€/kWh)	senza CCS	0,0536	0,0651
	con CCS	0,0808	0,0864
	% aumento	51%	32,6%
MC (€/tCO_2)		44,37	32,12

Tabella 42. Costo medio del combustibile e tassazione di 30 €/t CO_2

		USC	IGCC
COE (€/kWh)	senza CCS	0,0703	0,0833
	con CCS	0,0777	0,08329
	% aumento	10,64%	0%
MC (€/tCO_2)		12,21	-0,0367

Tabella 43. Costo alto del combustibile e tassazione di 30 €/t CO_2

		USC	IGCC
COE (€/kWh)	senza CCS	0,0746	0,08777
	con CCS	0,0836	0,0891
	% aumento	12,12%	1,5%
MC (€/tCO_2)		14,76	2,07

L'analisi Monte Carlo è stata condotta con l'ausilio del software di calcolo Matlab per la generazione di numeri casuali dalle distribuzioni in input. Questo ha permesso di caratterizzare il COE e l'MC in termini di media, mediana e deviazione standard e di confrontare i valori ottenuti a quelli deterministici nel caso di costo medio del combustibile ed assenza di tassazione.

Il COE delle tecnologie analizzate con il metodo Monte Carlo è risultato maggiore rispetto ai valori trovati con la formula classica, perché risente delle incertezze associate ai parametri di input (si va dal 6-14% in più sia per impianti con cattura sia per impianti senza cattura), anche se la tecnologia IGCC presenta un incremento globalmente inferiore rispetto a quella USC.

L'impiego di un modello probabilistico ha consentito di trovare una determinata soglia di costo "discriminante" tra i caso con cattura e quello senza cattura: se al di sotto di tale valore del COE cade la stragrande maggioranza dei casi senza cattura, è anche vero che essa viene superata quasi sempre dai casi con cattura (a dimostrazione del fatto che la forbice tra i casi con/senza cattura è molto ampia sia per IGCC che per USC).

Per quanto riguarda il costo di mitigazione, l'analisi Monte Carlo ha fatto emergere che il mitigation cost nel caso di un impianto USC è pari a 43 €/t CO_2, sostanzialmente in linea con il 41 € risultanti dall'applicazione della formula di calcolo deterministica introdotta da Tzimas e Peteves. Lo stesso vale per il costo di mitigazione per gli impianti IGCC: 33 €/t contro i 30 €/t. Questo rappresenta un punto a favore della tecnologia IGCC che, in particolari condizioni, può addirittura presentare un mitigation cost negativo).

Uno ampio e articolato studio sulle prestazioni di impianti di generazione elettrica da carbone basati sulle più moderne tecnologie di conversione dell'energia e di protezione ambientale è stato condotto dall'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica [Report RdS/2012/207].

Nel corso dello studio sono state approfondite le soluzioni realizzative più idonee per le tecnologie USC e IGCC e sono state valutate le prestazioni degli impianti considerati sia nella configurazione base più convenzionale, senza sistema di rimozione della CO_2, sia nella configurazione più complessa con l'integrazione dei sistemi di rimozione e compressione della CO_2.

Lo studio delle soluzioni tecnologiche considerate si basa su complessi modelli di simulazione appositamente sviluppati basati sui codici Aspen-Plus e Gate-Cycle. Il codice Aspen-Plus è stato più specificamente utilizzato per la simulazione dei processi di gassificazione e di trasformazione dei prodotti della gassificazione e della combustione, mentre il codice Gate-Cycle è stato più specificamente utilizzato per la simulazione delle sezioni di potenza.

Lo studio dell'impianto USC è stato svolto considerando un'alimentazione con un mix di carbone a basso tenore di zolfo e di carbone Sulcis ad elevato contenuto di zolfo e ceneri. I modelli sviluppati sono stati utilizzati, in particolare, al fine di valutare l'influenza della frazione di carbone Sulcis nel mix, e quindi di zolfo, sulle prestazioni delle sezioni di purificazione e condizionamento dei gas reflui e conseguentemente dell'impianto USC nel suo complesso. Il sistema di purificazione dei gas reflui considerato nel presente studio è basato sul processo integrato SNOX che consente la contestuale rimozione degli ossidi di azoto e di zolfo. Il sistema di rimozione della CO_2 è invece basato su un processo di assorbimento chimico con ammina (MEA). È stato inoltre sviluppato un modello preliminare semplificato dedicato allo studio del processo di assorbimento chimico della CO_2 tramite "chilled ammonia", solvente il cui utilizzo assicura consumi energetici decisamente minori rispetto ai solventi tradizionali come la MEA (metil-etanolammina).

L'impianto IGCC e stato invece alimentato con il solo carbone a basso tenore di zolfo e i modelli di simulazione sviluppati sono stati utilizzati per il confronto tra due differenti tecnologie di gassificazione a letto trascinato: Texaco e Shell. È stata inoltre valutata l'influenza della tecnologia di raffreddamento del syngas in uscita dal gassificatore sulle prestazioni dell'impianto IGCC, nelle due configurazioni convenzionale e integrata con sistemi di separazione della CO_2. In particolare sono state analizzate le tecnologie di raffreddamento a quench parziale o totale e il raffreddamento mediante scambiatori (Syngas Coolers). Nella configurazione integrata con sistemi di separazione della CO_2 il sistema di cattura è basato su un processo di assorbimento fisico, che consente la rimozione contestuale di H_2S e CO_2.

Sia l'impianto USC che quello IGCC garantiscono nella configurazione base prestazioni elevate in termini di potenza e rendimento. L'impianto USC, con un rendimento molto vicino al 45% fornisce prestazioni leggermente superiori, infatti l'impianto IGCC Shell-Mitsubishi presenta un rendimento pari al 44,1%, mentre il Texaco-GE pari al 43,8%. Tuttavia nella configurazione integrata con i sistemi di rimozione e compressione della CO_2, l'impianto IGCC è caratterizzato da penalizzazioni notevolmente inferiori. In questo caso, infatti, mentre il rendimento dell'impianto USC si riduce a circa il 34,5%, il rendimento degli impianti IGCC può anche superare il 37%.

L'introduzione di una percentuale di carbone Sulcis, ricco di zolfo, nel carbone in ingresso all'impianto USC penalizza le prestazioni della sezione di potenza, ma ha un effetto benefico sul rendimento globale dell'impianto, in quanto le prestazioni dell'impianto di purificazione SNOX migliorano con l'aumentare della concentrazione di zolfo nel gas da trattare. L'integrazione della sezione di SNOX con gli impianti USC potrebbe pertanto rappresentare una reale opportunità per l'utilizzo di un carbone ricco di zolfo come quello del Sulcis, che negli impianti a vapore tradizionali utilizzato presenta notevoli problematiche.

La tecnologia di raffreddamento a quench totale, se pure molto semplice, comporta rendimenti globali dell'impianto molto bassi (circa 37-38%) e pertanto in un impianto IGCC la scelta deve ricadere su un raffreddamento a quench parziale o tramite syngas coolers. La prima soluzione assicura rendimenti leggermente

superiori (44,1% contro 43,0% per l'IGCC Shell-Mitsubishi e 4,8% contro 41,6% per l'IGCC Texaco-GE), ma richiede l'utilizzo di una tecnologia molto più avanzata e costosa e pertanto per valutare l'opzione migliore sarebbe necessaria un'approfondita analisi economica. Inoltre nel caso di integrazione con i sistemi di rimozione e compressione della CO_2 le prestazioni sono ancora più vicine (37,2% contro 36,2% per l'IGCC Shell-Mitsubishi e 36,3% contro 35,4% per l'IGCC Texaco-GE).

Le emissioni specifiche di CO_2 per entrambi gli impianti integrati con i sistemi di rimozione e compressione della CO_2 (90-100 g/kWh), infine, sono molto inferiori rispetto alle emissioni di impianti USC e IGCC tradizionali (pari a 750-800 g/kWh) e anche rispetto ai più moderni impianti combinati (circa 350 g/kWh).

Si vuole ora porre l'attenzione su un aspetto tecnologico decisivo per l'affermazione delle tecnologie CCS rappresentato dal il monitoraggio della CO_2 sequestrata geologicamente.

Le attività di monitoraggio in continuo delle eventuali fughe di CO_2 dai serbatoi di stoccaggio geologico costituiscono uno degli aspetti più critici nell'applicazione delle tecniche di CCS. Nell'ambito della collaborazione con il Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici - CERI - Università di Roma "La Sapienza, dopo che nei precedenti periodi di attività si è dato maggiore spazio alla determinazione dei valori di baseline tipici dell'area di indagine, sono stati sviluppati sistemi di monitoraggio ad hoc in grado di misurare le variazioni di concentrazioni di anidride carbonica sia nella fase insatura del terreno che in acqua (sia on-shore che off-shore).

A causa dell'inaspettata presenza d'acqua in alcuni punti di misura, nonché della impossibilità di raggiungere i 5 metri di profondità in uno dei pozzi scavati, l'istallazione di agosto 2011 ha permesso di mettere in funzione circa l'80% dei 18 punti di monitoraggio previsti nelle tre stazioni di monitoraggio.

Sfortunatamente durante il semestre invernale il problema della presenza d'acqua in numerosi punti di misura si è ulteriormente aggravato imponendo un importante intervento di manutenzioni straordinaria effettuato a maggio 2012.

Durante tale intervento sono state sia sostituite le sonde danneggiate (istallando nuove sonde equipaggiate con membrane semipermeabili e quindi idonee al monitoraggio in acqua), sia ricalibrate le sonde istallate nella zona insatura.

Durante il monitoraggio è stato possibile osservare che la variabilità naturale delle concentrazioni di CO_2, soprattutto nelle misure relative alla zona insatura del terreno, è piuttosto marcata (ben al di sopra della deviazione standard della popolazione statistica) confermando l'importanza di studiare accuratamente questo aspetto in un'ottica di definizione puntuale della baseline e, di conseguenza, della possibilità di discriminare le anomalie vere e proprie dalle variazioni naturali tipiche delle variabili ambientali.

Come accennato nell'introduzione, la raccolta e la trasmissione dei dati si è interrotta prematuramente in quanto in molti dei punti di misura la falda ha raggiunto un livello superiore rispetto a quanto comunicato dai tecnici in situ sommergendo anche le sonde equipaggiate con filtri idrofobici e quindi non idonee al monitoraggio in acqua. Tale episodio ha comportato l'irreversibile danneggiamento di numerose delle sonde istallate impedendo la prosecuzione della raccolta di dati. Questa condizione ha reso necessario un intervento di manutenzione straordinaria che ha previsto sia la sostituzione delle sonde danneggiate con nuove sonde equipaggiate con membrane semipermeabili, sia il controllo della calibrazione delle altre sonde (Figura 222).

Figura 222. Intervento di manutenzione effettuato per ripristinare la completa funzionalità dei sistemi e per verificare la corretta calibrazione delle sonde di misura

La Figura 223 mostra come i risultati ottenuti da diversi sensori istallati nella stessa sonda siano molto ben correlabili (soprattutto nel primo periodo di funzionamento). Dalla figura si osserva inoltre che, sebbene i valori misurati oscillino attorno ad uno stesso valore medio (diverso per la stagione secca in cui è maggiore e per la stagione invernale, in cui è inferiore) la variabilità naturale è piuttosto marcata. Lo stesso comportamento è ben spiegato anche dal grafico a dispersione di Figura 224.

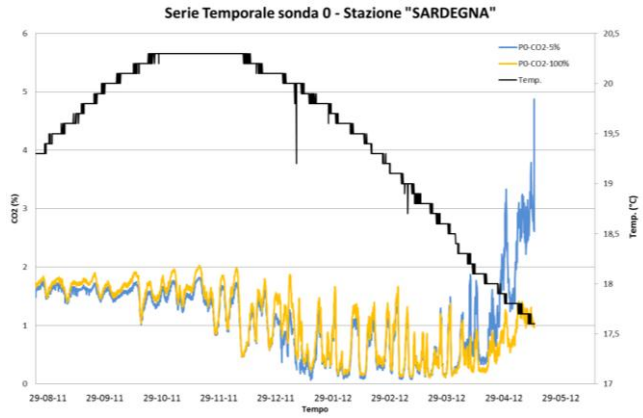


Figura 223. Concentrazione di anidride carbonica e temperatura misurate nell'arco di circa 8 mesi dalla sonda 0

Dalla figura si osserva che la risposta dei sensori è abbastanza omogenea fino a marzo, suggerendo che per più di 6 mesi la deriva strumentale può essere considerata trascurabile, per poi differenziarsi rapidamente negli ultimi 2 mesi di misure. Tale grafico, infatti, mostra almeno due popolazioni ben distinguibili: la prima, relativa ai primi mesi di misura, caratterizzata da una pendenza della retta di regressione prossima a 1 e da un r^2 pari a 0,95; la seconda, relativa alle ultime fasi di monitoraggio, caratterizzata da una pendenza pari a circa 0,45 e da un r^2 pari a circa 0,5.

In conclusione, nonostante il danneggiamento di alcune sonde inizialmente equipaggiate con filtri idrofobici e inaspettatamente sommerse dall'innalzamento del livello di falda e l'imprevista impossibilità di trasferimento dati legata all'aumento dei costi di trasmissione imposto dai provider telefonici, i sistemi sviluppati hanno dimostrato di essere idonei al monitoraggio delle aree di stoccaggio geologico della CO_2 sia in termini di sensibilità sia in termini di rapporto costo-risultati.

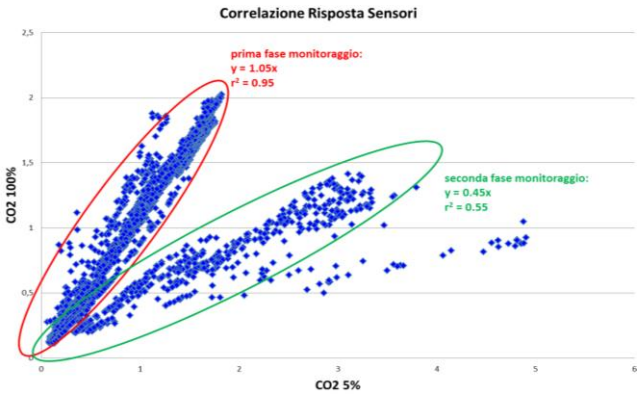


Figura 224. Grafico a dispersione che mette in relazione la concentrazione di CO_2 misurata dai due diversi sensori istallati nella sonda 0

In particolare la grande mole di dati raccolta dalla stazione "Sardegna" ha dimostrato: 1) la capacità dei sistemi di acquisire dati per lunghi periodi; 2) la notevole variabilità naturale delle concentrazioni di anidride carbonica; 3) la necessità di apportare piccoli accorgimenti finalizzati ad aumentare il periodo di monitoraggio esente da deriva strumentale.

Sulla base di questi risultati nonché in considerazione delle nuove acquisizioni che saranno effettuate nei prossimi mesi, sarà quindi possibile avere un quadro completo delle variazioni naturali di anidride carbonica nei tre siti monitorati. Tali dati costituiranno la base su cui valutare l'andamento delle concentrazioni in un'ipotetica fase di iniezione e post-iniezione del processo di CCS permettendo di discriminare l'eventuale presenza di reali fughe dal serbatoio di stoccaggio da segnali imputabili a variazioni naturali.

E' stata infine definita la predisposizione di una serie di linee guida per la progettazione e la realizzazione di sistemi di monitoraggio geochimico, in siti di interesse per lo storage geologico dell'anidride carbonica. Occorre premettere che il monitoraggio è estremamente "site specific", ovvero dipende dalle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dello specifico sito di stoccaggio, occorre pertanto affiancare al monitoraggio geochimico un'attenta ricostruzione tridimensionale della geologia riguardante il sito stesso. Si tratta in sintesi di elaborare un modello geologico completo di riferimento, su cui impostare il monitoraggio geochimico, affinché risulti garantita l'affidabilità e la sicurezza del sistema.

Ciò premesso, sono stati individuati una serie di passaggi e indagini che la progettazione di un adeguato sistema di monitoraggio deve prevedere:

- individuazione dei parametri e della metodologia di monitoraggio;
- piano di monitoraggio;
  - piano di monitoraggio in fase di pre-iniezione;
  - piano di monitoraggio in fase di iniezione;
  - piano di monitoraggio in fase di post-iniezione.

I dettagli di questo lavoro sono descritti nel Report RdS/2012/208.

Le attività svolte da Sotacarbo nell'ambito del presente obiettivo hanno riguardato:

- lo studio tecnico-economico sull'applicabilità del processo di co-gassificazione di carbone e biomasse con produzione di energia elettrica nel preesistente impianto di gassificazione Sotacarbo;
- lo studio e analisi progettuale per la realizzazione, presso il Centro Ricerche Sotacarbo di un sistema di combustione a polverino di carbone integrato con sistemi di cattura della CO_2 postcombustione, allegato al primo stato di avanzamento.
- Lo aggiornamento dello studio relativo all'impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2, allegato al primo stato di avanzamento.

In merito al primo tema è stata completata l'attività relativa allo studio tecnico-economico sull'applicabilità del processo di co-gassificazione di carbone e biomasse con produzione di energia elettrica nel preesistente impianto di gassificazione Sotacarbo da 5 MWt.

Nello studio sono stati trattati i seguenti argomenti:

- ruolo delle biomasse e le filiere energetiche
- la biomassa come fonte rinnovabile di energia
- classificazione delle biomasse
- potenzialità, tipologia e disponibilità di biomasse nell'area di interesse
- processi di conversione energetica della biomassa
- strumenti di incentivazione per l'impiego di biomasse: POIN 2007÷2013
- tecnologie di gassificazione di biomasse e co-gassificazione
- il processo di co-gassificazione applicato all'impianto dimostrativo Sotacarbo da 5 MWt
- le Integrazioni e modifiche impiantistiche necessarie
- valutazioni economiche del progetto
- collaudo e primo avviamento dell'impianto dimostrativo esistente.

Sono state analizzate tutte le attività necessarie per l'avvio dell'impianto dimostrativo di gassificazione, mai collaudato in tal senso ed è stata inoltre effettuata un'analisi dei costi necessari alla messa in servizio dell'impianto [Report RdS/2012/206].

Sono stati poi effettuati uno studio e un'analisi progettuale per la realizzazione, presso il Centro ricerche Sotacarbo, di un sistema di combustione a polverino di carbone integrato con sistemi di cattura della CO_2 postcombustione. Tale sistema dovrà essere integrato con la linea di trattamento gas dell'impianto pilota in cui si effettuerà l'abbattimento degli inquinanti quali polveri, composti dello zolfo e CO_2, dai fumi prodotti.

Il documento prodotto [Report RdS/2012/225] descrive, dopo una breve trattazione delle principali tecnologie per la cattura della CO_2 post-combustione, lo studio per la definizione dei principali parametri di progetto di un sistema di combustione a polverino di carbone, la sua progettazione ed integrazione con l'impianto pilota Sotacarbo.

E' stato infine effettuato un aggiornamento dello studio relativo all'impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 del Sulcis.

Nel rapporto RdS/2012/226 vengono ripresi e sintetizzati alcuni degli aspetti evidenziati nel documento "Stato dell'arte delle tecnologie CCS e proposta di una configurazione impiantistica per un impianto dimostrativo a carbone", sviluppato nell'ambito della precedente annualità dell'Accordo di Programma, sono stati integrati gli aspetti relativi alle procedure e alle attività propedeutiche all'emissione del bando di selezione del concessionario. In particolare, nel precedente studio è stato evidenziato che un progetto dimostrativo CCS si può sostenere economicamente solo se adeguatamente supportato da incentivi pubblici (considerati aiuti di stato ammissibili); stante questo fatto, nello studio si fa specificamente riferimento alla procedura da seguire per ottenere il nulla osta della Commissione Europea all'erogazione di aiuti di Stato per interventi di natura ambientale, regolamentata dalla "Disciplina comunitaria degli aiuti di Stato per la tutela ambientale".

Di seguito in Tabella 44 si riporta un analisi comparativa di prestazioni tra impianto con e senza CCS.

Tabella 44. Prestazioni delle configurazioni impiantistiche con e senza CCS

	Impianto con CCS	Impianto senza CCS
Potenza elettrica netta [MW]	488	488
Rendimento netto	34%	46%
Potenza termica lorda [MW]	1435	1061
Consumo totale di carbone [Mt/anno]	1,73	1,32
CO_2 prodotta [Mt/anno]	3,75	2,84
CO_2 separata [Mt/anno]	3,18	0,00
CO_2 emessa [Mt/anno]	0,56	2,84

La Tabella 45 è invece relativa ai sovra-costi complessivi netti del sistema con CCS.

Tabella 45. Valutazione dei sovracosti complessivi netti (in M€) per il sistema CCS

	Impianto CCS	Impianto senza CCS	Sovracosti CCS
Costi complessivi di investimento	2070,87	683,98	1386,90
Costi complessivi operativi per la centrale	1875,35	1376,53	498,82
Costi complessivi operativi per il sistema CCS	632,70	0,00	632,7
Costi di acquisto per le quote di emissione di CO_2	129,89	657,13	-527,24
TOTALE	4708,81	2717,64	1991,18

D. Partecipazione a organismi nazionali e internazionali

Le attività condotte in ambito internazionale risultano fondamentali per rafforzare il ruolo e la presenza italiana in un settore nel quale si gioca una delle sfide più difficili dei prossimi anni, quella cioè di accelerare il percorso verso una società "low carbon".

Di seguito vengono sinteticamente descritte le attività condotte nell'ambito di alcuni organismi internazionali e i relativi risultati più rilevanti. In particolare si farà riferimento a:

- Technical Group del CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum);
- IEA - Working party on Fossil Fuels e Implementing Agreement "Clean Coal Centre" (CCC);
- Global Carbon Capture and Storage Institute (GCCSI);
- Piattaforma tecnologica europea ZEP Zero Emission Fossil Fuels Power Plants);
- CCS-EII Team (Iniziativa Industriale Europea sulle CCS) del SET Plan (Strategic Energy technologies);
- EERA (European Energy research Alleance) per le tecnologie CCS;
- Delegazione europea nella visita in Australia.

Technical Group del **CSLF** *(Carbon Sequestration Leadership Forum)*: *partecipazione, quale delegato governativo italiano*. Il CSLF è un consesso internazionale, istituito a livello ministeriale, che attualmente coinvolge 24 nazioni più l'Unione Europea, che rappresentano oltre 3,5 miliardi di persone, pari a circa il 60% della intera popolazione mondiale. La missione del CSLF consiste nel facilitare lo sviluppo e l'applicazione delle tecnologie CCS attraverso collaborazioni internazionali volte a superare i principali ostacoli di ordine tecnico, economico ed ambientale, promuovendo anche la consapevolezza del pubblico nonché sviluppi normativi e finanziari internazionali.

Il CSLF ha ormai assunto un ruolo fondamentale nel panorama internazionale, ed ha operato in stretta sinergia con l'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) nella stesura di documenti strategici per vari incontri, quali il G8-Energia di Roma dove, si ricorda, il nostro Paese ha sottoscritto importanti accordi di collaborazione anche con il governo USA.

La partecipazione assidua dell'Italia a tutte le riunioni del CSLF ha consentito al nostro Paese di mantenere uno stretto contatto con tutti i principali attori internazionali e di promuovere le iniziative italiane.

Nel meeting di Edmonton (Maggio 2011) era stato presentato il progetto Porto Tolle dell'ENEL, poi incluso nella lista dei grandi progetti supportati dal CSLF. Nel meeting ministeriale di Pechino (Settembre 2011) si è discusso su obiettivi e tempi di realizzazione del progetto Porto Tolle, analizzando anche le altre attività italiane sia di R/D che relative a nuovi pilota e/o dimostrativi da realizzare nell'area del Sulcis. Nel successivo meeting di Bergen (Maggio 2012) si è continuata l'analisi delle priorità internazionali per l'aggiornamento del piano strategico e della road-map del CSLF. A valle dei meeting sono state visitate importanti installazioni sperimentali: un impianto coal to liquid con cattura e stoccaggio della CO_2 nella regione della Mongolia cinese, e un'area dedicata alla sperimentazione di tecniche di cattura a Mongstad. Entrambi i governi cinese e norvegese partecipano in maniera determinante alle citate iniziative, sia avendo definito un quadro strategico certo, sia attraverso il supporto economico.

IEA: partecipazione al working party on Fossil Fuels e Implementing Agreement "Clean Coal Centre" (CCC). Si tratta di iniziative di estrema importanza relative all'intero settore dei combustibili fossili, in particolare il solo carbone per l'implementing Agreement CCC, nel quale ha assunto un ruolo primario la tematica delle CCS: ciò è dovuto alla consapevolezza - unanimemente condivisa - che nei prossimi decenni il ricorso ai fossili sarà ancora massiccio e determinante, e l'unica via per un loro impiego il più possibile sostenibile sta nell'applicazione delle tecnologie CCS. Ciò richiede la realizzazione di grandi impianti dimostrativi basati sulle tecnologie attuali (come noto poco efficienti e assai costose, e dunque non ancora competitive) per la sperimentazione su scala industriale dell'intera "filiera" cattura-trasporto-stoccaggio, e lo sviluppo si sistemi di seconda generazione per raggiungere la competitività economica. Essenziali sono le attività sullo stoccaggio, per la determinazione accurata delle potenzialità effettive, per la caratterizzazione dei siti, e per accrescere il livello di confidenza e accettabilità sociale. Quello di IEA è, dunque, un consesso cruciale al quale l'Italia ha partecipato presentando le iniziative nazionali e confrontandole con quelle degli altri paesi. In particolare, è stato chiesto di tenere una presentazione ufficiale delle attività in Italia nel corso della riunione del Working Party di Parigi (Dicembre 2011).

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 progetti pilota e dimostrativi. Hanno aderito al GCCSI tutti i Paesi dell'Europa maggiormente impegnati nello sviluppo delle tecnologie CCS, oltre a Stati Uniti, Canada, Messico, Sud-Africa ed altri Paesi dell'Oceania e dell'Asia. L'adesione al GCCSI ha consentito di entrare in un circuito internazionale che sta assumendo un ruolo di leadership assoluta quale stakeholder "indipendente", di acquisire informazioni anche su progetti extra-europei. Sono state acquisite le condizioni per partecipare a pieno titolo alla rete di alleanze tecnologiche e industriali che nasceranno nell'ambito dell'organizzazione, di essere costantemente aggiornati sugli sviluppi normativi e regolamentari del CCS nel mondo e, infine, di valutare i risultati delle varie iniziative di comunicazione attivate dagli altri membri.

Piattaforma tecnologica europea ZEP Zero Emission Fossil Fuels Power Plants): partecipazione alla Technology Task Force. La piattaforma tecnologica ZEP (fondata nel 2005) unisce e rappresenta gli operatori industriali europei impegnati nelle tecnologie CCS; partecipano rappresentanti dei Governi nazionali, del mondo della ricerca e di organizzazioni terze. Svolge un ruolo essenziale per la definizione delle strategie europee. I membri della Task Force Tecnology (TFT), oltre a incontrarsi periodicamente per la messa a punto degli indirizzi da suggerire alla Commissione – in funzione delle attività di finanziamento di progetti di ricerca e dimostrazione - hanno operato, usando ampiamente lo strumento delle riunioni via Skype, per la stesura di documenti quali la road-map e uno studio assai importante sui costi delle CCS: tale ultimo documento è diventato un riferimento internazionale essenziale per le valutazioni economiche sulle varie tecnologie, ed evidenzia la fattibilità del raggiungimento di condizioni idonee per la applicazione commerciale delle CCS a partire dal 2020.

CCS-EII Team (Iniziativa Industriale Europea sulle CCS) del **SET Plan (**Strategic Energy technologies). E' un gruppo costituito da un rappresentante per ciascuno Stato membro, da alcuni rappresentanti della piattaforma ZEP e di EERA, e da alcuni stakeholder. Svolge un ruolo cruciale per la definizione degli indirizzi attuativi delle varie iniziative previste in ambito SET Plan, cercando di armonizzare le attività di ricerca, pilota e dimostrative, e allo stesso tempo allargando occasioni di cooperazione fra gli Stati. In particolare sono state concordate e trasmesse alla Commissione le linee guida per i bandi FP7 e NER300, dopo aver definito un piano strategico ed un insieme di Key Performance Indicators (KPIs). L'Italia ha presentato il proprio programma (costruito dalla integrazione delle varie iniziative, pubbliche e private) attraverso un documento complessivo, e si è confrontata con gli altri Paesi in

particolare in merito al progetto dimostrativo di Porto Tolle dell'ENEL. Si è anche avuto modo di approfondire le conoscenze di tale progetto nel corso di 2 audit, ai quali è stato chiamato anche il rappresentante italiano nel CCS-EII Team, che la Commissione ha tenuto con ENEL per valutare lo stato di avanzamento delle attività finanziate con 10 M€ del "Recovery Plan". E' stato presentato anche il progetto dimostrativo SULCIS, ancora in fase di fattibilità, peraltro molto apprezzato.

EERA (European Energy research Alleance) per le tecnologie CCS. E' un organismo analogo alla piattaforma ZEP ma riunisce gli operatori del mondo della ricerca sulle tematiche ritenute cruciali, e fra esse le CCS. Il lavoro svolto si è concentrato sulla definizione del Joint Programme (JP), un ampio programma di ricerca con obiettivi nel medio-lungo periodo costruito con il concorso di un numero rilevante di organismi dei vari Paesi che hanno concordato di armonizzare programmi in corso e già finanziati. L'ENEA, insieme ai suoi associati (varie Università) ha proposto il pacchetto delle attività svolte nell'ambito dell'ADP MSE-ENEA, con ciò valorizzando tali attività e creando opportunità per future collaborazioni. E' da rilevare che il ruolo di EERA sarà cruciale nei prossimi anni in quanto si prevede che, in ambito Horizon 2020, i finanziamenti comunitari verranno assegnati non più a singoli progetti ma a programmi complessivi, come appunto i JPs: è stato, dunque, essenziale essere fra i promotori dell'iniziativa, caratterizzando l'ENEA come uno fra i principali partner del JP. Nell'assemblea generale di Giugno 2012 si è concordato di aggiornare il JP entro l'anno, anche a seguito della adesione di altri membri.

Delegazione europea nella visita in Australia: partecipazione in qualità di rappresentante europeo di EERA. Sono stati discussi possibili collaborazioni fra la UE e l'Australia, sono stati visitati importanti laboratori di ricerca, analizzando le rispettive priorità/iniziative, e incontrati rappresenti del Governo della regione Vittoria (a Melbourne) e dello Stato (a Camberra). Il risultato più tangibile è stato la possibilità per organismi australiani di partecipare all'ultimo bando FP7 (scadenza Novembre 2012).

Le attività svolte in ambito internazionale sono state utili per rafforzare il ruolo e la presenza italiana in un settore nel quale si gioca una delle sfide più difficili dei prossimi anni, che è quella di accelerare il percorso verso una società "low carbon"; due sono le considerazioni a monte:

a) nei prossimi decenni continuerà l'impiego massiccio di combustibili fossili;
b) l'unico modo per limitare i danni è l'impiego delle CCS. E' una sfida che si gioca a livello globale, che richiede una sempre maggiore e più efficace cooperazione internazionale.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito del progetto, numerose attività sono state affidate a soggetti esterni, che vantano una consolidata e riconosciuta esperienza nel settore specifico. Le attività condotte dai partner si integrano perfettamente con le attività condotte da ENEA e le arricchiscono dal punto di vista scientifico.

Nelle note seguenti viene data una sintetica descrizione di tali attività relative alle collaborazioni, raggruppate per obiettivo intermedio.

A.1 Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

Università di Cagliari, Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche

Attività di ricerca: "Sintesi e sperimentazione di materiali innovativi per il trattamento del syngas da carbone"

I temi sviluppati nell'ambito della collaborazione riguardano la sintesi e la sperimentazione del trattamento di desolforazione a caldo del syngas da carbone, effettuato tramite l'utilizzo di materiali innovativi basati in particolare su nanocompositi costituiti da ZnO e altri ossidi confinati in silice mesostrutturata del tipo SBA-15. Si tratta di materiali alternativi rispetto a quelli utilizzati nei processi tradizionali di desolforazione basati sull'impiego di ammine organiche o di sorbenti tradizionali supportati su materiali quali allumina, che possono fornire prestazioni superiori.

Il lavoro, che parte dai risultati ottenuti nella precedente annualità, ha riguardato la preparazione di materiali in forma di polvere e lo studio delle proprietà sorbenti. Successivamente lo studio si è esteso alla sintesi ed alla valutazione delle prestazioni di materiali pellettizzati in geometrie definite e nell'ordine di 3 - 8 mm. A valle della sintesi dei materiali, le attività hanno riguardato lo studio delle performance di prova del sorbente impiegato

nell'assorbimento di gas acidi quali H_2S e COS e nella rigenerazione effettuata in atmosfera ossidante. In parallelo sono stati condotti studi comparazionali su sorbenti a base di ferriti di cobalto/SBA-15 e ossidi di ferro/SBA-15.

Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente

Attività di ricerca: "Attività di progetto, realizzazione e sperimentazione di un dispositivo di abbattimento del tar".

I temi sviluppati hanno riguardano attività di tipo sperimentale, nell'ambito delle tecnologie di gassificazione del carbone, di trattamento e depurazione del syngas, prodotto in sistemi di cattura di tipo pre-combustion, nel suo contenuto in tar.

Sulla base dei risultati ottenuti nell'annualità precedente, è stato progettato e realizzato un dispositivo di "filtrazione reattiva" del tar e particolato di tipo autotermico, che possa essere implementato su impianti di taglia medio-piccola. Il principio di funzionamento del dispositivo si basa sulla realizzazione delle reazioni di reforming del tar e del particolato prodotto dalla gassificazione di carboni sub-bituminosi e biomasse al fine di ridurre i loro quantitativi nei gas.

La finalità dello studio è quella di verificare da un punto di vista energetico, di efficienza e di durata, la reale applicabilità del suddetto dispositivo, andando a misurare i principali parametri di funzionamento quali, temperatura e contenuto in tar. Il prodotto finale ottenuto viene testato da ENEA per prove su taglia maggiore.

A.3 Analisi del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone (Coal To Liquid)

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia

Attività di ricerca: *"Sintesi Fischer-Tropsch su catalizzatori a base di ferro per la produzione di combustibili liquidi da carbone".*

I temi sviluppati hanno riguardano l'analisi e la sperimentazione del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone tramite il processo Fischer-Tropsch, naturale prosecuzione di quanto svolto nel corso della precedente annualità.

L'obiettivo è rappresentato dallo sviluppo di un processo di produzione energetica intrinsecamente pulito, in grado di abbattere il costo dei sistemi di trattamento dei gas esausti e dall'incremento dell'efficienza di conversione energetica che passa attraverso l'ottimizzazione della componentistica relativa alla generazione ed al trattamento del gas di sintesi prodotto a partire dal carbone al fine di produrre combustibili liquidi.

L'attività è stata in particolare focalizzata sulla sintesi di Fischer-Tropsch (FT) condotta su catalizzatori a base di ferro, opzione identificata come via di potenziale interesse per la conversione del gas di sintesi derivante da gassificazione del carbone del Sulcis. Il lavoro è stato strutturato nelle seguenti fasi:

- sintesi e caratterizzazione di materiali catalitici a base di ferro per la sintesi Fischer-Tropsch;
- progetto e realizzazione di un set-up sperimentale per condurre le attività di ricerca in condizioni rappresentative e a pressioni ridotte;
- attività sperimentale su scala da laboratorio su impianto FT di alta pressione disponibile presso i laboratori del Politecnico di Milano, in modo da investigarne la reattività in condizioni rappresentative;
- messa a punto di un metodo per l'identificazione e la quantificazione di tutti i prodotti di reazione;
- analisi di letteratura volta al reperimento di modelli di conversione del CO per la FT su catalizzatori a base di ferro;
- sviluppo di un codice numerico per la simulazione del comportamento di un reattore ideale PFR in termini materiali, note le condizioni di processo e la cinetica di consumo del CO.

B.1 Attività sperimentali sulla cattura della CO_2 ad elevata temperatura mediante sorbenti solidi a base di ossido di calcio

Università dell'Aquila, Dipartimento di Chimica, Ingegneria Chimica e Materiali

Attività di ricerca: *"Studi e sperimentazioni sulle tecnologia impiantistica ZECOMIX per la produzione di elettricità e idrogeno da syngas da carbone e supporto alla messa a punto dell'impianto*".

I temi sviluppati hanno riguardato lo studio della fattibilità di tecnologie di separazione della CO_2 attraverso l'uso di sorbenti solidi ad alta temperatura, e più specificatamente la cinetica della cattura a caldo dell'anidride carbonica, in un processo ciclico di carbonatazione - calcinazione, considerando particelle di dimensioni variabili, e metodologie di caratterizzazione chimico-fisica delle particelle di sorbente. A tal fine è stato implementato un modello chimico-fisico per la simulazione del reattore a letto fluidizzato, per la separazione di CO_2 da syngas proveniente da un processo di gassificazione del carbone, in cui la cattura della CO_2 e lo steam reforming degli

idrocarburi possono essere condotti simultaneamente attraverso un processo integrato (sorption enhanced steam reforming). Uno studio specifico è stato infine rivolto alla ottimizzazione di schemi di processo per la gassificazione del carbone con simultanea cattura dell'anidride carbonica, e riutilizzo in loco della CO_2 prodotta come agente gassificante (dry reforming), in un impianto che comprenda letti fluidi interconnessi, con particolare attenzione ai bilanci di materia e energia, e alle condizioni di processo. In parallelo agli studi modellistici e di laboratorio illustrati, è stata garantita la necessaria collaborazione ad ENEA per curare le fasi di collaudo e avviamento dell'impianto di gassificazione - decarbonatazione Zecomix della Casaccia.

B.2 Studi modellistici e sperimentali sui processi di cattura della CO_2 con solventi

Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali

Attività di ricerca: *"Analisi e modellazione dinamica di impianti di cattura postcombustione della CO_2 che utilizzano solventi a base di ammine".*

I temi sviluppati hanno riguardato l'analisi e la modellazione dinamica dei processi di trattamento degli effluenti gassosi prodotti in moderne centrali termoelettriche a carbone.

La letteratura scientifica si riferisce generalmente a studi di centrali che operano in condizioni di progetto (a pieno carico) in funzionamento stazionario. Questo tipo di approccio non contempla né il comportamento transitorio di questi impianti (avviamenti e fermate), né le questioni relative alle regolazioni di carico effettuate ogni giorno in base alle direttive provenienti dal gestore della rete. Per contro il crescente ricorso a energie rinnovabili, richiederà alle centrali a combustibile fossile un grado ancora più elevato di flessibilità. Per queste ragioni, e per motivazioni di carattere economico, la comprensione del comportamento dinamico risulta essere essenziale qualora si vada ad integrare le tecnologie CCS in impianti di produzione elettrica

Obiettivo dell'attività di ricerca è stato quindi la valutazione dell'integrazione di una unità completa di cattura post-combustione (con ammine) della CO_2 in impianti a vapore ultrasupercritici di taglia industriale (660 MWe). A tal fine è stato sviluppato uno strumento, che mediante l'utilizzo di pacchetti software commerciali (Aspen, Hysys), permette di analizzare i diversi processi, di definire e progettare i principali componenti d'impianto e del sistema di controllo, di studiare il comportamento dell'impianto in risposta al variare delle condizioni di esercizio (off-design).

L'analisi ha permesso di sviluppare un modello che permetterà di individuare le condizioni ottimali di esercizio in funzione del prezzo dell'energia elettrica valutando i periodi di transitorio da una condizione all'altra e analizzando le variabili di sistema al fine di minimizzare le perdite energetiche ed ottimizzare il profitto economico.

Università di Firenze, Dipartimento di Chimica "Ugo Shiff"

Attività di ricerca: *"Indagini Sperimentali sulla Cattura di CO_2 con Nuovi Metodi a Basso Consumo Energetico".*

L'attività condotta ha avuto l'obiettivo di sperimentare metodi efficienti per la cattura chimica di CO_2 che richiedano il minore consumo energetico possibile. La frazione maggiore dell'energia richiesta dall'intero processo (superiore al 50%), si riferisce allo stadio di desorbimento di CO_2 e contemporanea rigenerazione dell'assorbente chimico e dunque su questo stadio del processo è più conveniente intervenire per ridurre il costo energetico dell'intero processo. Lo studio sperimentale proposto è stato volto alla formulazione di liquidi assorbenti innovativi che possano essere rigenerati a temperature relativamente basse (minori di 100 °C) alla pressione atmosferica, che abbiano calore specifico ed entalpia di evaporazione bassi e siano il più possibile stabili termicamente e nei confronti dell'ossidazione. Per raggiungere questo obiettivo si è previsto di sostituire l'acqua che costituisce il componente principale (70-80% in peso) degli assorbenti tradizionali con liquidi organici, in particolare alcoli di basso costo e larghissima produzione industriale. Siccome la cinetica del processo è altrettanto importante della termodinamica, tanto più che si opera a temperature relativamente basse, sono state messe a punto tecniche che, a parità di temperatura, aumentino la cinetica di desorbimento-rigenerazione in modo da raggiungere efficienza di assorbimento di CO_2 non inferiore al 90%.

L'Università ha inoltre collaborato alla caratterizzazione di un processo innovativo basato su un nuovo solvente brevettato da ENEA.

B.3 Sviluppo di bruciatori avanzati per la combustione di syngas ricchi di idrogeno

Università "Roma Tre", Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale (DIMI)

Attività di ricerca: *"Caratterizzazione aerodinamica e aeroacustica di bruciatori non convenzionali di tipo Trapped Vortex".*

I temi sviluppati hanno riguardato lo sviluppo di un nuovo bruciatore avanzato per turbogas, di tipo Trapped Vortex ideato per la combustione stabile, efficiente, e a basse emissioni di syngas ricchi di idrogeno provenienti da impianti operanti in modalità "pre-combustion carbon capture".

Oggetto dell'accordo è lo studio aerodinamico ed aeroacustico mediante sperimentazione, di un modello di bruciatore di tipo Trapped Vortex operante in condizioni non reattive. Lo studio ha lo scopo di caratterizzare il comportamento del flusso per diverse condizioni di funzionamento e di individuare la configurazione ottimale soprattutto in termini di efficacia del mescolamento dei gas entranti e minimizzazione degli effetti di risonanze di tipo acustico o legate alle fluttuazioni di pressione a parete. I dati ottenuti attraverso la sperimentazione sono stati utilizzati da ENEA per la validazione di codici di calcolo e come riferimento per la messa a punto di modelli di turbolenza o di sottogriglia da utilizzare in simulazioni numeriche di tipo RANS o LES.

E' stato effettuato uno studio parametrico, di tipo sperimentale, della configurazione di un bruciatore di III generazione, al fine di ottimizzare il mescolamento dei gas e minimizzare degli effetti di risonanze di tipo acustico o legate alle fluttuazioni di pressione a parete.

Di concerto con ENEA, sono stati definiti i principali parametri di funzionamento da analizzare (verosimilmente portate e velocità dei flussi entranti) e conseguentemente la matrice sperimentale di prova.

La sperimentazione è stata effettuata utilizzando:

- misure di campi di velocità tramite tecnica Particle Image Velocimetry (PIV)
- misure di fluttuazione di pressione a parete mediante microfoni
- misure di velocità puntuali mediante tecnica Laser Doppler Velocimetry (LDV) monocomponente
- Misure simultanee di velocità e pressione tramite opportuna sincronizzazione dei sistemi di acquisizione (PIV/microfoni o LDV/microfoni)

I dati sperimentali così ottenuti hanno costituito elemento fondamentale per la definizione della geometria ottimale del bruciatore e per la validazione delle simulazioni numeriche parallelamente condotte da ENEA.

B.4 Messa a punto di tecnologie numeriche per l'ottimizzazione del processo di ossi-combustione di polverino di carbone

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica

Attività di ricerca: *"Modellazione della cinetica di ossidazione del char da carbone"*.

Nei due anni precedenti l'attività del Politecnico ha avuto per oggetto lo sviluppo di modellistica cinetica legata alla volatilizzazione del carbone, al rilascio di composti solforati e azotati, nonché alla ossidazione in fase gas. Oggetto della presente collaborazione è la "modellazione della cinetica di ossidazione del char da carbone".

Le attività della presente annualità hanno mirato allo sviluppo di un modello predittivo in grado di descrivere il processo di ossidazione eterogenea gas/solido del residuo carbonioso (char) del carbone che viene a formarsi a valle del processo di volatilizzazione.

Il processo di ossidazione e gassificazione del char è un processo superficiale che coinvolge l'adsorbimento delle specie gassose sui siti attivi presenti sulla superficie, la migrazione delle specie superficiali e il deadsorbimento di quest'ultime. Per effetto della crescita dei pori nelle fasi iniziali, l'area superficiale aumenta, determinando un incremento della reattività del char, per poi subire una diminuzione a seguito della riduzione dell'area superficiale dovuta al collassamento dei pori. In letteratura esistono diversi modelli cinetici di ossidazione e gassificazione del char, tuttavia specifici per un particolare carbone o non in grado di contemplare la molteplicità di aspetti chimico-fisici coinvolti nell'ossidazione del char. L'obbiettivo che ci si è proposti è quello di gettare le basi per la formulazione di un modello cinetico multi-step abile a caratterizzare il chimismo e la reattività del char, in grado di considerare sia la variabilità morfologica dei differenti char che le differenze di composizione. Il modello proposto ha carattere predittivo e richiede quindi informazioni solamente sulla composizione elementare del carbone di partenza e sulle condizioni operative del processo.

Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale (DIMA)

Attività di ricerca: "*Sviluppo di tecniche e modelli numerici per LES nel codice HeaRT per la simulazione di processi di combustione di miscele mono-multifase*".

Le attività sono finalizzate allo sviluppo di strumenti numerici avanzati per il superamento dei limiti dei codici CFD commerciali nella comprensione delle fenomenologie fisico-chimiche sottostanti la combustione del carbone e di miscele idrogenate. L'ossi-combustione è una tecnologia relativamente nuova, che ha ancora bisogno di attività di ricerca per l'ottimizzazione dei dispositivi industriali, e la CFD è uno degli strumenti indispensabili sia per la

progettazione che per la comprensione delle complesse fenomenologie fisico-chimiche che intervengono. L'approccio LES è il più indicato per lo studio di queste fenomenologie, sebbene ancora estremamente costoso dal punto di vista computazionale. I modelli presenti nei codici commerciali hanno ancora necessità di sviluppo. Per quanto riguarda la combustione del carbone un ulteriore limitazione all'uso dell'approccio LES sono le grandi dimensioni dei combustori industriali. Per questo motivo sin dallo scorso anno l'attività è stata finalizzata, oltreché allo sviluppo della modellistica multifase, alla messa a punto di tecniche numeriche che riducano i costi computazionali per la simulazioni di grandi e complesse geometrie.

L'attività di quest'anno è quindi prosecuzione delle attività di sviluppo modellistico e di validazione eseguite nel corso delle precedenti annualità. I risultati sono stati la definizione ed implementazione nel codice ENEA HeaRT di un modello mesoscopico per la simulazione di miscele multifase con approccio euleriano-euleriano, lo sviluppo di una tecnica numerica (IVM) per il trattamento di geometrie di combustori complesse e la implementazione di una tecnica di "griglie multilivello" per il trattamento di geometrie discretizzate con mesh di diversa risoluzione spaziale all'interno del dominio di simulazione. Terminata la fase di integrazione e di prima validazione delle tecniche e modelli implementati lo scorso anno, quest'anno l'attività è stata destinata alla loro messa a punto sulla base dei risultati ottenuti ed una loro ulteriore validazione.

Sono stati validati:

- l'integrazione dei modelli di devolatilizzazione e gassificazione all'interno del solutore del codice ENEA HeaRT, mediante dati sperimentali provenienti dall'impianto IPFR dell'IFRF;
- il modello multifase completo in condizioni reattive;
- la tecnica di mesh refinement integrandola con la tecnica IVM.

Le attività sono state svolte in stretta collaborazione con i ricercatori di ENEA .

C.2 Studi su tecnologie di fissaggio della CO_2 con metodi chimici

Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Civile (UTV)

Attività di ricerca: "*Caratterizzazione dei residui dell'unità di gassificazione (di carbone o biomasse) del processo Zecomix e valutazione delle opzioni di riutilizzo dei residui, finalizzate alla riduzione dell'impatto ambientale del processo*".

Nel corso delle annualità 2010 e 2011, il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Roma Tor Vergata ha svolto due studi per conto di Enea. Il primo, svolto in collaborazione con il Politecnico di Zurigo (ETH) e l'Università di Roma "La Sapienza", è stato finalizzato a valutare la fattibilità del processo di carbonatazione di minerali e residui industriali come opzione per lo stoccaggio di anidride carbonica, con particolare riferimento alla possibilità di integrazione con impianti per la produzione di energia di piccola/media taglia. Il secondo ha consentito di estendere la valutazione sulla fattibilità del processo di carbonatazione applicato direttamente alla cattura e stoccaggio di CO_2 da gas di sintesi prodotto da processi di gassificazione di carbone o biomasse.

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e UTV hanno riguardato la caratterizzazione dei residui prodotti dalla unità di gassificazione dell'impianto dimostrativo Zecomix e la successiva valutazione delle diverse opzioni potenziali di riutilizzo, basate sulle caratteristiche chimiche, fisiche ed ambientali dei residui stessi. Tra le opzioni, sono state incluse quelle basate su processi di carbonatazione/ granulazione, che sono state oggetto di valutazioni preliminari nel corso delle attività svolte in precedenza limitatamente a scorie di acciaieria. Le opzioni più interessanti sono state testate mediante prove di laboratorio, che hanno consentiranno di valutare le prestazioni in termini di caratteristiche chimico-fisiche ed ambientali dei materiali ottenuti e le potenzialità di riutilizzo nell'ambito del processo Zecomix.

L'attività si è articolata secondo le seguenti fasi:

- Caratterizzazione dei materiali - Caratterizzazione dei residui di gassificazione finalizzate a stimarne la reattività per valutare le opzioni di riutilizzo.
- Prove sperimentali di granulazione - Sono state condotte prove di granulazione dei residui di gassificazione con l'obiettivo di migliorare le proprietà ambientali del materiale e di ottenere un materiale utilizzabile nel settore delle costruzioni. Le prove sono state guidate da simulazioni modellistiche al fine di individuare i parametri operativi di maggiore importanza, quali il dosaggio d'acqua, la tipologia e dosaggio del binder e di eventuali additivi. I materiali ottenuti sono stati caratterizzati in termine di distribuzione granulometrica, composizione chimica e mineralogica e mediante test di cessione che consentono di valutarne le proprietà ambientali, al fine di verificarne la compatibilità con opzioni di riutilizzo.
- Prove sperimentali di carbonatazione - Sono state condotte prove di carbonatazione dei residui di gassificazione. Tali prove hanno l'obiettivo di valutare la possibilità di utilizzare i residui della gassificazione

per sequestrare la CO_2 prodotta dall'unità di cattura dell'impianto Zecomix. E' stata anche valutata la possibilità di condurre il processo di carbonatazione nel reattore di granulazione, in modo da ottenere un materiale con potenzialità di riutilizzo nel settore delle costruzioni. I materiali ottenuti sono stati caratterizzati in termine di distribuzione granulometrica, composizione chimica e mediante test di cessione che consentono di valutarne le proprietà ambientali.

- Schema di processo e bilanci di materia ed energia - E' stato sviluppato uno schema di processo, che include le operazioni di pretrattamento dei solidi e di post-trattamento dei prodotti e degli eventuali reflui. Per ogni operazione unitaria è stato fornito un dimensionamento di massima, definiti i bilanci materiali e valutati i requisiti energetici.

C.3 Ottimizzazione progettuale di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 mediate ECBM ed iniezione in acquiferi salini

Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica

Attività di ricerca: *"Modellazione e valutazione di processi di conversione termica del carbone basati su tecnologie USC e IGCC con trattamenti di purificazione degli effluenti gassosi e con rimozione della CO_2".*

Nel corso dei precedenti progetti di ricerca sono stati sviluppati complessi modelli di simulazione, basati sui codici Aspen-Plus e Gate-Cycle, che permettono di simulare le prestazioni delle due tipologie di impianti (USC e IGCC) nelle seguenti configurazioni di base:

- impianto a vapore USC integrato con un impianto SNOX di desolforazione e di denitrificazione dei gas di scarico e con un impianto di rimozione chimica della CO_2 con ammine;
- impianto IGCC basato su un gassificatore a letto trascinato di tecnologia Texaco integrato con una sezione di shift-conversion del CO e di rimozione fisica della CO_2.

Con riferimento agli impianti a vapore USC, l'attività di ricerca ha permesso lo sviluppo di una modellistica per la simulazione del processo di assorbimento chimico della CO_2 con solventi a base di ammoniaca (processi "chilled ammonia"). Questo processo sta riscuotendo negli ultimi anni un sempre maggiore interesse, sia perché necessita di una ridotta energia per il desorbimento della CO_2 dal solvente, sia perché è basato su un solvente non corrosivo e non soggetto a degradazione. Il processo richiede comunque una consistente spesa energetica per il raffreddamento dei gas di scarico sino alla temperatura della colonna di assorbimento e comporta inoltre la formazione di composti solidi nel solvente in uscita dalla sezione di assorbimento. Attraverso i modelli sviluppati le prestazioni dei sistemi di rimozione della CO_2 basati sui processi "chilled ammonia" sono state confrontate con le prestazioni dei più tradizionali sistemi di rimozione della CO_2 basati su processi di assorbimento chimico con una soluzione acquosa di MEA (Metil-Etanolammina).

Con riferimento agli impianti IGCC, l'attività di ricerca ha permesso, a partire dalla configurazione di base con gassificatore Texaco e raffreddamento del syngas mediante scambiatori "syngas coolers", lo sviluppo di nuovi modelli per la simulazione di impianti IGCC basati su differenti tecnologie di gassificazione a letto trascinato e su differenti tecnologie di raffreddamento del syngas prodotto ad alta temperatura. In particolare i modelli sono in grado di valutare le prestazioni dei gassificatori Shell e Prenflo che, con i gassificatori Texaco, rappresentano le tecnologie largamente più utilizzate negli impianti IGCC, e che sono inoltre adatti ad essere alimentati con vari tipi di carbone, anche di bassa qualità. I modelli sviluppati permettono inoltre di simulare impianti di gassificazione con raffreddamento del syngas ottenuto sia mediante syngas coolers, che mediante processi di "quench". Sono stati inoltre sviluppati modelli dedicati per la simulazione di differenti tecnologie di purificazione (processi di desolforazione ad alta e bassa temperatura) del gas di sintesi e di differenti processi di assorbimento fisico della CO_2.

L'ultima fase dell'attività di ricerca in oggetto è stata incentrata sull'analisi delle prestazioni degli impianti di produzione di energia elettrica da carbone considerati, e dei sistemi di cattura della CO_2 integrati, nell'ipotesi di alimentazione con carbone Sulcis, ad alto tenore di zolfo. In particolare è stata valutata l'influenza del contenuto di zolfo nel carbone, sulle prestazioni dell'impianto SNOX di desolforazione e denitrificazione integrato con l'impianto a vapore ultrasupercritico.

CE.RI. - Centro di Ricerca, Previsione e Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici, Università di Roma "La Sapienza"

Attività di ricerca: *"Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO_2 e loro applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis ".*

Oggetto del contratto è lo studio e sperimentazione di reti di monitoraggio geochimico di siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO_2, ed in particolare:

- la predisposizione di una serie di linee guida per la progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio geochimico in siti di interesse per lo storage geologico della anidride carbonica;
- l'ampliamento e l'esercizio sperimentale di una rete di monitoraggio installata presso l'area del bacino minerario del Sulcis;
- L'elaborazione e la valutazione dei dati raccolti (mappatura GIS, faglie….) nella prospettiva di ricavare utili informazioni circa la capacità di storage indefinito e la valutazione del rischio ad esso associato.

Più in dettaglio, il lavoro è stato strutturato nelle seguenti fasi:

- Predisposizione di linee guida - Individuazione dell'ambito procedurale e normativo con percorsi tipici applicabili per la valutazione del sito, la progettazione della rete di monitoraggio, l'acquisizione e l'elaborazione dei dati finalizzati a valutazioni strategiche circa capacità e sicurezza nel tempo dei siti di stoccaggio geologico della CO_2 in linea con il recente decreto di recepimento della direttiva europea sullo storage.
- Ampliamento di una rete di monitoraggio - Estensione dell'attuale rete di centraline di monitoraggio geochimico installate nel corso delle passate annualità presso l'area del bacino carbonifero del Sulcis. Si è raggiunta la quantità totale di 16 punti di campionamento in continuo a terra nel sito in concessione di ricerca gestito dalla società Carbosulcis SpA. Tali sistemi sono costituiti da una serie di diverse sonde e unità di controllo centrali responsabili dell'alimentazione, della registrazione, del trasferimento dei dati e dell'interrogazione dei sensori connessi via cavo. Il trasferimento dei dati avviene in tempo reale e in remoto via web. I dati vengono trasmessi automaticamente e continuamente via web anche verso ENEA.
- Esercizio sperimentale: Acquisizione, trasmissione ed elaborazione dati - E' stata effettuata la misura diretta al suolo ed a profondità di qualche decina di centimetri delle concentrazioni e del flusso di CO_2, CH_4 e di altri parametri di interesse (quali temperatura, umidità, pH, etc). La finalità è quella di definire le variazioni naturali dei valori di flusso e/o di concentrazione nei suoli della CO_2 prodotta da processi biologici (background o baseline) quali termini di riferimento per l'individuazione di eventuali fughe di CO_2 profonda.

Sotacarbo S.p.A.

Attività di ricerca: "*Analisi e sperimentazione di processi e tecnologie che trovano applicazione in impianti di produzione energetica da carbone equipaggiati con sistemi di cattura e sequestro della CO_2"*

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione riguardano l'analisi e la sperimentazione di processi e tecnologie che trovano applicazione in impianti di produzione energetica da carbone, equipaggiati con sistemi di cattura e sequestro della CO_2. In questo ambito le attività andranno a concentrarsi sullo sviluppo e la messa a punto di studi e applicazioni sperimentali che nel breve-medio termine daranno, nel sito del Sulcis, dimostrazione delle soluzioni tecnologiche più mature applicate ad impianti di produzione energetica da carbone equipaggiati con cattura e stoccaggio della CO_2.

Nel sito del Sulcis sono già in corso, in particolare sugli impianti della Piattaforma Sperimentale di Gassificazione del Carbone presso Sotacarbo, attività di ricerca sul tema e specificamente relative allo sfruttamento ecosostenibile di combustibili fossili quali il carbone a cui collaborano, oltre alla Regione e l'ENEA, le società Sotacarbo e Carbosulcis, titolare quest'ultima dell'omonima miniera di carbone. Il sito, sede di sperimentazione della cattura della CO_2 prodotta, è anche prossimo a siti adatti ad un eventuale stoccaggio della CO_2 in giacimenti acquiferi salini profondi presenti al di sotto degli strati carboniferi del bacino Sulcis.

In linea con quanto sopra detto l'attività oggetto dell'accordo di collaborazione tra ENEA e Sotacarbo S.p.A. è volta dunque allo sviluppo di tecnologie avanzate per un utilizzo pulito dei combustibili fossili e del carbone in particolare, per poter supportare la realizzazione di impianti dimostrativi e per superare le principali problematiche legate alla penalizzazione, in termini di costo e di rendimento, che lo stato attuale delle tecnologie CCS implicano nelle applicazioni energetiche.

il lavoro ha riguardato i temi di seguito descritti.

A.1 Sperimentazione e ottimizzazione di impianti di gassificazione

L'esperienza maturata durante le campagne sperimentali svolte nel corso delle precedenti annualità ha consentito la modifica ed il miglioramento dei diversi processi e sezioni dell'impianto che, a partire dalla gassificazione del carbone, consente di produrre energia elettrica e syngas ad altissimo tenore di idrogeno.

Rimane la necessità 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 (rigenerazione delle ammine e preriscaldo agenti gasificanti). In particolare su tale impianto verranno effettuate prove che globalmente riguarderanno:

- Prove di gassificazione di carbone di diversa provenienza (in particolare basso rango) con diversi agenti gasificanti (aria, aria arricchita, vapore, CO_2);
- Prove di co-gassificazione con carbone e biomasse di vario tipo;
- Prove di pulizia e trattamento del syngas (lavaggio, depolverazione, desolforazione, WGS);
- Prove di produzione energia elettrica e idrogeno (con MCI e PSA);
- Prove di cattura della CO_2 su syngas e fumi da carbone con l'utilizzo di solventi a base di ammine;
- Prove sull'impianto di rigenerazione dei solventi utilizzati nei processi di cattura della CO_2;
- Prove di caratterizzazione e verifica dei sistemi di campionamento e analisi.

Per poter eseguire le sperimentazioni sopra indicate sarà necessario apportare delle migliorie alla componentistica degli impianti preesistenti, inserendo nuova sensoristica e modificando alcuni componenti e sistemi ausiliari in modo da poter effettuare sperimentazioni più accurate e con funzionamento stabile ed in continuo. Tra gli investimenti principali si prevede: l'inserimento di un agitatore manuale del letto di gassificazione, integrazioni al sistema di depolverazione con l'inserimento di opportuni sistemi di misura delle polveri, ripristino dei sistemi di compressione e purificazione del syngas dall'azoto (PSA), di un gasometro e di un sistema di acquisizione dati ad integrazione dell'unità di produzione di energia elettrica, integrazioni al sistema di acquisizione segnali dell'impianto di rigenerazione ammine, l'acquisizione di un nuovo sistema di campionamento e analisi del syngas a supporto dell'analizzatore gas (mGC) attualmente in uso.

A latere verranno effettuate alcune modifiche all'unità di gassificazione predisponendo opportunamente una serie di accessi al reattore che consentiranno ad ENEA di proseguire lo studio di caratterizzazione del processo attraverso la misura del livello e la misura delle temperature in parete.

Si prevede di effettuare in quest'ambito un totale di circa 350 ore di sperimentazione a caldo e circa 50 ore di prove e collaudi a freddo comprensive di prove di lunga durata in linea con gli obbiettivi dichiarati di verifica e sperimentazione del funzionamento in continuo dei processi e degli impianti.

B.2 Studi sui processi di cattura della CO2 con solventi a base di ammine

Le attività sperimentali riguardano l'ottimizzazione del processo di cattura della CO_2 mediante l'impiego di diversi solventi liquidi in condizioni che, grazie all'utilizzo di apposite miscele di gas, simulano quelle di pre- e di post-combustione tipiche della cattura operata sul syngas proveniente dalla gassificazione del carbone e sui fumi provenienti dalla sua combustione in caldaie e turbine a gas. Con questa finalità verranno condotte, presso il laboratorio opportunamente allestito da Sotacarbo nel corso della passata annualità, diverse prove volte a valutare e caratterizzare il processo di cattura della CO_2 attuato con diversi solventi liquidi.

Le sperimentazioni saranno principalmente volte ad ampliare il campo di analisi rispetto a quanto già effettuato nel corso della passata annualità e ad effettuare test di rigenerazione dei solventi con cicli ripetuti di assorbimento e desorbimento effettuati al fine di valutare la variazione della capacità assorbenti nel tempo; nonché di determinare il calore specifico (per unità di CO_2 desorbita) necessario alla rigenerazione. In particolare verranno effettuate attività sperimentali su:

<u>*Assorbimento dell'anidride carbonica*</u>

Mantenendo le stesse concentrazioni di CO_2 adottate nella passata annualità (5, 15 e 30% in volume) verrà ampliato il campo di variabilità dei parametri operativi testando soluzioni acquose mono componente MEA (in concentrazione 3, 5 e 7 M), DEA e MDEA e nuovi solventi ottenuti miscelando MEA, MDEA e Piperazina.

Nel complesso, verranno effettuate le seguenti tipologie di prova:

1. prove di saturazione a ciclo chiuso per ciascun solvente considerato e per ciascuna composizione (come % di CO_2 in volume) considerata;
2. prove a ciclo aperto per ogni solvente considerato, per ognuna delle tre differenti concentrazione di CO_2 ipotizzate e per tre differenti rapporti L/G (o tre valori di portata liquida con portata gassosa costante);
3. prove specifiche di saturazione parziale in modo da determinare, a seconda del caricamento della soluzione, i valori di pH e densità della soluzione stessa di MEA 5M;
4. prove funzionali con cicli di assorbimento effettuate con soluzione precedentemente rigenerata con MEA 5M sottoposta a cicli di assorbimento/rigenerazione in laboratorio.

<u>Rigenerazione dei solventi (Desorbimento dell'anidride carbonica)</u>

Verranno effettuate prove di rigenerazione del solvente, precedentemente sottoposto alla fase di assorbimento. L'attività prevede la misura della vita del sorbente e la stima della sua degradazione a seguito dei cicli ripetuti di

assorbimento/rigenerazione; nonché la stima per ogni prova del calore specifico fornito. Anche in questo caso verranno svolte prove a saturazione, a ciclo aperto e con solventi parzialmente carichi.

L'impianto in oggetto, attualmente disponibile presso i laboratori del Centro Ricerche Sotacarbo, è costituito da una colonna a riempimento in materiale vetroso e dal relativo circuito di caricamento, ricircolo e ausiliari. L'impianto è completato con la dotazione gli strumenti di analitica gas, basati su gascromatografia, utili per monitorare l'andamento del processo tramite le concentrazioni delle diverse specie nel gas in uscita. In particolare sono previste modifiche e migliorie per consentire l'effettuazione di prove di rigenerazione termica dei solventi e una misura più accurata delle grandezze di interesse.

Grazie all'inserimento di una caldaia e in generale di componentistica (valvole, misuratori e regolatori portata gas di tipo massico, flussimetri , termocoppie, etc) indispensabile alla opportuna effettuazione delle prove, verrà caratterizzato il processo di rigenerazione dei solventi nel dettaglio dei suoi parametri fondamentali. Verranno inoltre effettuate delle valutazioni tecnico-economiche volte alla definizione degli allestimenti opportuni nel caso si voglia operare con gas contenenti composti dello zolfo. Si procederà anche al miglioramento della sicurezza degli operatori in laboratorio con l'inserimento di un sistema di aspirazione.

Nel complesso delle attività, particolare attenzione verrà indirizzata alla valutazione e misura delle efficienze di cattura, delle capacità di assorbimento specifico della CO_2 all'interno del singolo solvente, del degradamento delle prestazioni del solvente utilizzato al variare del numero di cicli, della quantità specifica di energia necessaria alla rigenerazione, variando i principali parametri di processo quali tipologia e la concentrazione di solvente, la tipologia e la composizione delle correnti gassose trattate, le portate delle correnti liquide e gassose, la temperatura di rigenerazione.

Si prevede di effettuare in quest'ambito un totale di circa 150 ore di sperimentazione equamente distribuite tra le sperimentazioni relative alle fasi di assorbimento e desorbimento.

C.3 Studio e ottimizzazione progettuale di un impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2 mediate ECBM ed iniezione in acquiferi salini

Le attività in oggetto prevedono lo sviluppo di studi progettazione relativi all'applicazione del processo di co-gassificazione di carbone e biomasse con produzione di energia elettrica nell'impianto dimostrativo da 5 MWt. L'analisi prevede la valutazione delle problematiche legate al funzionamento dell'impianto dimostrativo e le modifiche necessarie alla messa in marcia dell'impianto con l'integrazione dello stesso con le sezioni di pulizia del syngas e di produzione di energia elettrica tramite elettro-generatori, basati su motori a combustione interna.

Un'ulteriore studio ed analisi progettuale verrà effettuato per definire un sistema generatore di fumi da combustione del carbone costituito da un combustore a polverino di carbone da installare ed integrare con la sezione di cattura della CO_2 e rigenerazione dei solventi per poter effettuare meglio test di cattura in postcombustione.

Un'altra attività che viene condotta è quella di aggiornamento dello studio relativo all'impianto dimostrativo a carbone con cattura e confinamento geologico della CO_2, con il prosieguo delle attività svolte nella precedente annualità per la predisposizione dello studio preliminare per la realizzazione di un impianto dimostrativo delle tecnologie CCS presso l'area del bacino minerario del Sulcis.

Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Il Piano Triennale 2009-2011 della Ricerca di Sistema Elettrico ha dato molta rilevanza al tema degli usi finali dell'elettricità, con l'obiettivo sia di individuare come le proposte di innovazione si calino e si adattino ai bisogni ed alle condizioni d'uso dei consumatori, sia per far emergere dal comportamento quotidiano degli utilizzatori le esigenze di ricerca da riportare al mondo produttivo.

E' l'utilizzatore finale che decreta il successo di un prodotto o di una proposta sulla base non solo delle prestazioni formali ma anche della flessibilità e della facilità d'uso, ugualmente anche il prezzo viene spesso percepito in rapporto stretto alle prestazioni. Questa miscela di motivazioni tecniche, economiche e di prestazioni percepite rende complesso il passaggio delle innovazioni dal laboratorio all'utente finale, problema questo sempre più rilevante oggi quando la grande industria, con le sue scelte formalizzate, perde il ruolo di consumatore principale di elettricità, sorpassata dal settore civile, servizi e residenziale.

Scopo dell'attività è quello di promuovere e diffondere l'implementazione di tecnologie efficienti per la riduzione dei consumi elettrici nel settore dei servizi. Il riferimento programmatico è il Piano di Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica che intende mobilitare la società civile, i responsabili politici e gli operatori del mercato e trasformare il mercato interno dell'energia, in modo da fornire ai cittadini infrastrutture, prodotti, processi e servizi energetici che siano globalmente i più efficienti sul piano energetico.

Il Piano mette in luce l'importanza di applicare norme minime di rendimento energetico a un ampio ventaglio di apparecchiature e prodotti (dagli elettrodomestici come i frigoriferi ed i condizionatori, televisori, scalda-acqua, ecc., fino ai motori e agli inverter industriali), per gli edifici e per i servizi energetici. In questo contesto verranno proseguite le attività per l'adeguamento della normativa nazionale alla legislazione europea in merito a requisiti minimi (Eco-Design) e etichettatura.

Inoltre, un ruolo principale viene assegnato alla promozione dell'autoproduzione di energia e diffusione della cogenerazione nel settore terziario e dei servizi allo scopo di abbattere gli ostacoli e le barriere che ancora si frappongono all'estensione del mercato, anche attraverso l'analisi di meccanismi di incentivazione normativi ed economici.

Infine, un altro aspetto cruciale affrontato dal presente progetto riguarda lo sviluppo di strumenti e servizi per l'efficienza energetica con il duplice scopo di contribuire a ridurre i consumi aggiungendo "intelligenza" a sistemi complessi (sistemi di controllo per ecobuildings, reti attive di distribuzione, integrazione di sistemi di produzione di energia basati su fonti rinnovabili) oltreché sui singoli componenti consentendo di ottimizzare le operazione nell'ottica di un minore consumo.

L'insieme delle precedenti azioni punta ad un modello di sviluppo in cui possano articolarsi in modo armonico sia i fattori connessi alla necessità di un'immediata riduzione dei consumi, sia quelli connessi alla necessità di preparare un cambiamento tecnologico industriale. In tale contesto le politiche centrate sullo stimolo della domanda hanno elevato considerevolmente il livello d'informazione sulle singole tecnologie e la disponibilità di normative forzanti o incentivanti, rendendo economicamente attraente il ricorso alle tecnologie efficienti ed all'integrazione delle fonti rinnovabili.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

L'obiettivo finale dell'attività consiste nella realizzazione di strumenti e metodi, che mirano alla promozione di tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di favorire il mercato di prodotti più performanti sia a livello di componenti, che consumano energia, sia a livello di sistemi che la producono, e all'integrazione di tali tecnologie e all'ottimizzazione della loro gestione in un contesto territoriale circoscritto per mezzo di una configurazione di rete secondo il modello di generazione distribuita orientata al settore dei servizi.

Il conseguimento del suddetto obiettivo si è articolato attraverso quattro diverse linee di attività:

A. Etichettatura Energetica ed Ecodesign: sviluppo di specifiche, implementazione e controllo di mercato;
B. Promozione della microcogenerazione in un contesto di micro-rete attiva per applicazioni nel settore civile;
C. Sviluppo di strategie ottimali di gestione delle reti termiche;

D. Sviluppo di modelli per il contenimento dei consumi energetici nel sistema edifici-impianti connesso ad una rete complessa.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Etichettatura Energetica ed Ecodesign: sviluppo di specifiche, implementazione e controllo di mercato

Attività di sviluppo e controllo della legislazione europea sull'etichettatura e i requisiti minimi per l'efficienza energetica per nuovi prodotti

Le direttive 2009/125/EC e 2010/30/EU prevedono l'emanazione di misure di implementazione che contengono i requisiti minimi di efficienza energetica/eco-progettazione e le etichette energetiche dei prodotti relativi all'energia, cioè beni e servizi che consumano energia nella fase d'uso o che hanno influenza sul consumo di energia quando installati.

L'Italia è fra i maggiori paesi produttori di apparecchi domestici e professionali per la refrigerazione (frigoriferi e congelatori), il lavaggio (lavatrici, lavastoviglie, asciugatrici), la cottura (forni, cucine e cappe aspiranti), il condizionamento e la ventilazione (condizionatori d'aria e ventilatori) e per gli apparecchi ed impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale.

I principali risultati dell'azione di sviluppo e controllo della legislazione europea sull'etichettatura e i requisiti minimi di efficienza sono riportati di seguito.

- *Elettrodomestici: asciugatrici, forni, piani cottura e cappe per cucina*

Il Regolamento delegato 392/2012/UE sullo schema di etichettatura delle asciugatrici a tamburo per uso domestico è stato pubblicato il 9 maggio 2012 sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea. La nuova etichetta (Figura 226) sarà obbligatoria dal 29 maggio 2013. Tale regolamento è accompagnato dal parallelo Regolamento di ecodesign, votato dagli Stati Membri il 10 maggio 2012 e ora in corso di adozione da parte del Parlamento Europeo e del Consiglio, che stabilisce criteri minimi di immissione sul mercato di questi prodotti a partire da metà 2013.

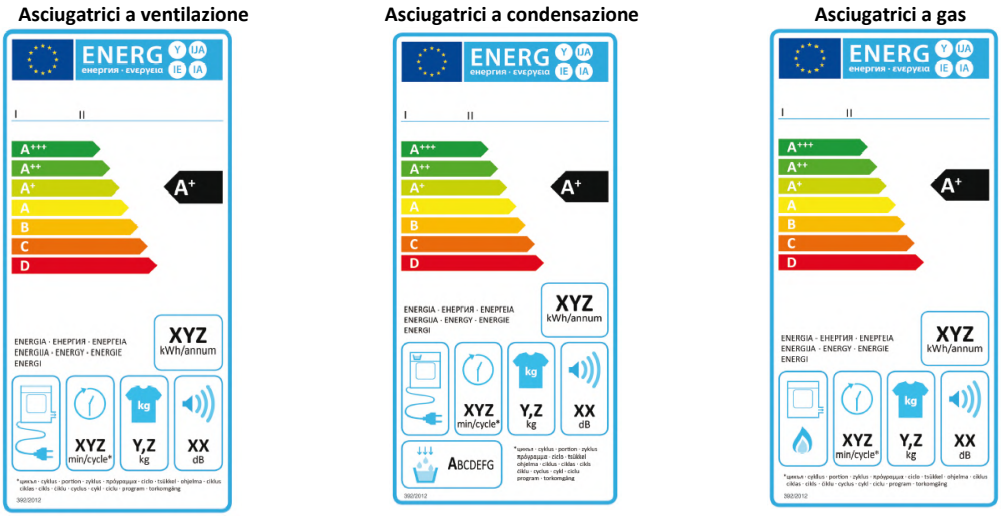


Figura 225. Etichette per le asciugatrici a tamburo per uso domestico

Per i forni e i piani cottura sia elettrici che a gas la Commissione aveva inizialmente proposto la definizione di uno schema di etichettatura (forni) e di requisiti minimi di ecodesign (forni e piani cottura) comuni per le due fonti energetiche. I commenti di alcuni Stati Membri fra cui l'Italia e di altri attori del mercato hanno portato ad una nuova proposta che definisce requisiti specifici diversi per i prodotti elettrici e a gas che sono stati discussi al Consultation Forum nel luglio 2012.

Le proposte di misure di etichettatura ed ecodesign per le cappe da cucina sono in discussione da oltre un anno in quanto la Commissione aveva prima inserito questi prodotti nel gruppo degli apparecchi per la ventilazione senza tenere conto della loro specificità tecnica e tecnologica. ENEA, con il supporto dell'industria nazionale che è il maggiore produttore europeo di questi prodotti - e di altri Paesi, ha preparato una proposta alternativa che

prevede una etichettatura energetica in tre fasi che è stata prima condivisa con le autorità di alcuni Stati Membri interessati a questo specifico elettrodomestico e poi presentata alla Commissione. Tale proposta è stata discussa al Consultation Forum dell'aprile 2012 e nel luglio 2012.

- *Grandi prodotti: scaldacqua e caldaie per il riscaldamento domestico e la produzione di acqua calda sanitaria*

La proposta della Commissione Europea per gli apparecchi ed impianti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale è stata modificata sulla base dei commenti ricevuti dagli Stati Membri e dalle associazioni industriali, pur mantenendo la specifica che solo gli apparecchi con contributo solare (o di altre RES) raggiungono le massime classi di efficienza energetica. Un esempio dell'etichetta per gli scaldaacqua è riportata in Figura 226,

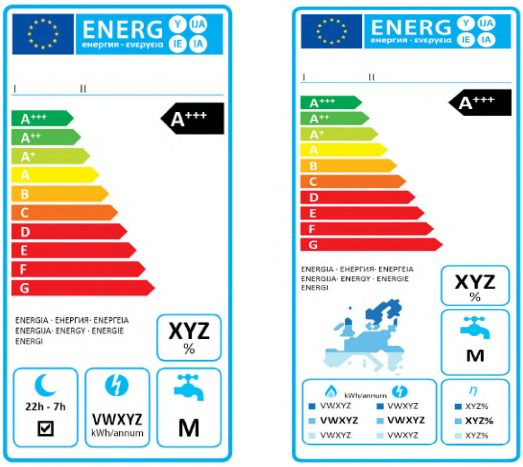


Figura 226. Etichette per scaldacqua tradizionali (a) e scaldacqua solari e a pompa di calore (b)

- *Piccoli apparecchi: aspirapolvere, macchine per il caffè*

Per entrambi i prodotti la Commissione ha preparato sino dal 2011 delle proposte di etichettatura energetica e requisiti di ecodesign che hanno ricevuto numerosi commenti negativi da parte sia degli Stati Membri che degli altri attori del mercato. Le proposte sono state modificate e saranno portate al voto degli Stati Membri nel Regulatory Committee entro la fine del 2012.

- *Illuminazione*

La discussione delle politiche europee per questo prodotto è descritta nella sezione relativa al Progetto 3.2 "Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici".

- *Apparecchi del settore non-domestico: frigoriferi professionali ed altri apparecchi per la refrigerazione commerciale*

Per i frigoriferi commerciali la proposta iniziale della Commissione presentata nel gennaio 2012 era basata su un ridotto numero di informazioni e dati relativi ai prodotti inclusi in due schemi volontari esistenti nel Regno Unito e in Danimarca, che però riguardano solo il 20% dei prodotti a più elevata efficienza presenti sul mercato in questi Paesi. I dati raccolti da ENEA, per lo studio realizzato per conto dell'Associazione CECED Italia a supporto della definizione di uno schema di etichettatura volontaria degli apparecchi per la refrigerazione professionale, sono stati utilizzati per predisporre una proposta alternativa italiana. Tale proposta è stata discussa con il consulente della Commissione e utilizzata come riferimento per preparare una nuova proposta di misure di etichettatura energetica ed ecodesign che sono state presentate agli stakeholder durante la riunione informale degli esperti del luglio 2012.

Le proposte di requisiti di efficienza energetica per gli altri prodotti della refrigerazione commerciale (abbattitori di temperatura, raffreddatori commerciali e celle frigorifere) sono al momento in revisione da parte della Commissione dopo i commenti ricevuti dagli Stati Membri e dagli altri attori del mercato alla riunione del Consultation Forum del marzo 2012.

- *Altri prodotti industriali: trasformatori, pompe per l'acqua*

La proposta di requisiti di ecodesign per i trasformatori elettrici è stata discussa per la prima volta al Consultation Forum nell'aprile 2012 e ha suscitato significative reazioni negative da parte dell'industria. La Commissione sta ora considerando i commenti ricevuti per una eventuale modifica dei criteri di ecodesign proposti.

I requisiti di ecodesign per le pompe di circolazione per l'acqua sono stati invece positivamente votati dagli Stati Membri nel maggio 2012 e il relativo Regolamento è in fase di adozione da parte del Parlamento Europeo e del Consiglio prima della pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea.

Recepimento nazionale della direttiva 2010/30/UE

Lo "Schema di decreto legislativo di attuazione della direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010 concernente l'indicazione del consumo di energia e di altre risorse dei prodotti connessi all'energia, mediante l'etichettatura ed informazioni uniformi relative ai prodotti. Attuazione Legge comunitaria 2010" è stato approvato dal Consiglio dei Ministri del 30 maggio 2012. Il decreto legislativo in corso di pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale, è costituito da 16 articoli e prevede in particolare:

- *controllo del mercato:* all'articolo 4, per garantire l'attuazione delle responsabilità attribuite agli Stati Membri, individua nel Ministero dello Sviluppo Economico l'Ente responsabile a livello nazionale delle funzioni di vigilanza e competente per l'attuazione della direttiva. La disposizione conferma l'identica previsione già contenuta all'articolo 6 del DPR 11. 107/1998, integrandola e precisandola, anche per tener conto delle disposizioni del regolamento CE 765/2008. Tale competenza sarà svolta dalla Direzione generale per il mercato, la concorrenza, il consumatore, la vigilanza e la normativa tecnica, in collaborazione, in particolare per gli aspetti di promozione dell'efficienza energetica, con la Direzione generale per l'energia nucleare, le energie rinnovabili e l'efficienza energetica. Il decreto specifica anche che l'ENEA fornisce supporto al Ministero dello Sviluppo Economico ai fini dello svolgimento delle funzioni di vigilanza ad esso assegnate;
- *etichettatura volontaria*: il decreto regola l'etichettatura volontaria in conformità al considerando n. 12 della direttiva, secondo cui l'applicazione di sistemi del tutto facoltativi di etichettatura energetica potrebbe ingenerare confusione se non addirittura disinformazione, nonché all'articolo 15 della direttiva stessa che espressamente include fra i comportamenti da sanzionare anche l'uso non autorizzato dell'etichetta. E' a tal fine previsto che l'etichettatura volontaria sia autorizzata di volta in volta, per singole tipologie di prodotti per i quali non sia stato ancora definito il contenuto della corrispondente etichettatura obbligatoria e limitatamente ai casi in cui siano concordate regole adeguate di etichettatura e di controllo mediante protocolli di intesa stipulati con l'ENEA dalle associazioni di categoria più rappresentative;
- *le sanzioni:* l'articolo 13 del decreto istituisce le sanzioni da applicare in caso di violazioni delle disposizioni adottate in attuazione della direttiva stessa e delle violazioni dei relativi atti delegati, incluso l'uso non autorizzato dell'etichetta. Tali disposizioni sostituiscono integralmente le sanzioni (contestualmente abrogate) previste dall'articolo 5 del decreto del Presidente della Repubblica 12 agosto 1982, tenendo conto del loro importo, ma incrementandole ed migliorandole in modo da renderle proporzionate e, al tempo stesso, renderne effettiva la dissuasività.

Analisi della corretta presenza dell'etichetta energetica nei punti vendita nazionali e diffusione dell'etichettatura energetica

Nell'Aprile 2012 la società di ricerca di mercato GfK ha realizzato per ENEA una rilevazione ed analisi sulla presenza delle nuove etichette energetiche sugli elettrodomestici esposti alla vendita nel panorama distributivo italiano.

Lo scopo dell'azione era rilevare, mediante personale qualificato IFR precedentemente formato e addestrato, all'interno di tutti i punti vendita rappresentativi identificati nel panel di riferimento la presenza delle nuove Etichette Energetiche Europee (Direttiva quadro 2010/30/UE) sugli elettrodomestici esposti alla vendita. Le categorie di prodotti Interessati sono state le seguenti, per un totale di 54 negozi monitorati:

- frigoriferi e congelatori di libera installazione e da incasso
- cantinette refrigerate per vini
- cucine con forno elettrico a libera installazione
- forni elettrici da incasso
- lavastoviglie
- lavatrici (lavatrici + lavasciugatrici)
- asciugatrici
- condizionatori d'aria.
- La tipologia e il numero dei punti vendita oggetto dell'analisi è stato:
- Gruppi d'Acquisto di Elettronica (23)
- Catene di Elettronica (15)
- Ipermercati (7)
- Mercatoni (2)
- Cucinieri/Arredamento (7)

Le regioni e le province coinvolte sono state: Campania (Napoli), Emilia Romagna (Bologna), Lazio (Roma), Lombardia (Milano), Piemonte (Torino), Puglia (Bari), Sicilia (Catania), Toscana (Firenze) e Veneto (Venezia).

Per ciascun prodotto esposto delle categorie individuate è stata rilevata una serie di caratteristiche tecniche e soprattutto la presenza dell'etichetta energetica di nuovo tipo oppure quella di vecchio tipo e se quest'ultima (e

rilevata) era o meno conforme alle disposizioni precedentemente emanate dalle autorità competenti. Le caratteristiche tecniche e di prodotto relative al canale "Cucinieri/Arredamento" non sono rilevate, ma solo inserite come puro rapporto tra il numero dei prodotti presenti per categoria e numero di etichette rilevate per tipologia. I risultati per gruppo di prodotto, regione e città sono presentati rispettivamente nelle seguenti tabelle.

Tabella 46. Presenza dell'etichetta energetica nei punti vendita per i diversi gruppi di prodotto

Categoria di Prodotto	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme	Totale Articoli	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme
Asciugatrici	50	17	22	588	**677**	7,4%	2,5%	3,2%	86,9%
Cantinette per Vini	67	2		5	**74**	90,5%	2,7%	0,0%	6,8%
Congelatori	47	437	14	301	**799**	5,9%	54,7%	1,8%	37,7%
Forni Elettrici	738	11	94	1030	**1873**	39,4%	0,6%	5,0%	55,0%
Frigoriferi e Frigocongelatori	171	2057	119	1250	**3597**	4,8%	57,2%	3,3%	34,8%
Lavastoviglie	97	862	44	441	**1444**	6,7%	59,7%	3,0%	30,5%
Lavatrici	249	2363	134	1413	**4159**	6,0%	56,8%	3,2%	34,0%
Condizionatori d'Aria	182	10	6	604	**802**	22,7%	1,2%	0,7%	75,3%
Televisori	3269	2965			**6234**	52,4%	47,6%	0,0%	0,0%
Totale complessivo	**4870**	**8724**	**433**	**5632**	**19659**	**24,8%**	**44,4%**	**2,2%**	**28,6%**

Tabella 47. Presenza dell'etichetta energetica nei punti vendita per città

Regione Geografica	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme	Totale Articoli	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme
CAMPANIA	785	818	2	435	**2040**	38,5%	40,1%	0,1%	21,3%
EMILIA	419	1044	3	579	**2045**	20,5%	51,1%	0,1%	28,3%
LAZIO	449	1292	307	665	**2713**	16,5%	47,6%	11,3%	24,5%
LOMBARDIA	588	1154	91	810	**2643**	22,2%	43,7%	3,4%	30,6%
PIEMONTE	400	735	3	632	**1770**	22,6%	41,5%	0,2%	35,7%
PUGLIA	608	1058	1	805	**2472**	24,6%	42,8%	0,0%	32,6%
SICILIA	598	953	5	675	**2231**	26,8%	42,7%	0,2%	30,3%
TOSCANA	395	889	20	520	**1824**	21,7%	48,7%	1,1%	28,5%
VENETO	628	781	1	511	**1921**	32,7%	40,7%	0,1%	26,6%
Totale complessivo	**4870**	**8724**	**433**	**5632**	**19659**	**24,8%**	**44,4%**	**2,2%**	**28,6%**

Tabella 48. Presenza dell'etichetta energetica nei punti vendita per canale di vendita

Città	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme	Totale Articoli	Etichetta Assente	Nuova Etichetta	Vecchia Etichetta Non Conforme	Vecchia Etichetta Conforme
BARI	608	1058	1	805	**2472**	24,6%	42,8%	0,0%	32,6%
BOLOGNA	419	1044	3	579	**2045**	20,5%	51,1%	0,1%	28,3%
CATANIA	598	953	5	675	**2231**	26,8%	42,7%	0,2%	30,3%
FIRENZE	395	889	20	520	**1824**	21,7%	48,7%	1,1%	28,5%
MILANO	588	1154	91	810	**2643**	22,2%	43,7%	3,4%	30,6%
NAPOLI	785	818	2	435	**2040**	38,5%	40,1%	0,1%	21,3%
ROMA	449	1292	307	665	**2713**	16,5%	47,6%	11,3%	24,5%
TORINO	400	735	3	632	**1770**	22,6%	41,5%	0,2%	35,7%
VENEZIA	628	781	1	511	**1921**	32,7%	40,7%	0,1%	26,6%
Totale complessivo	**4870**	**8724**	**433**	**5632**	**19659**	**24,8%**	**44,4%**	**2,2%**	**28,6%**

ENEA partecipa da anni al SC 59/61 SC 59/61G *Lavabiancheria e lavastoviglie* del TC 59/61 *Apparecchi utilizzatori elettrici per uso domestico e similare* del CEI. Il SC 59/61G si occupa delle norme e dei progetti normativi di sicurezza e prestazioni relativi a macchine lavatrici, centrifughe, asciugabiancheria a tamburo, lavastoviglie. Nel 2012 gli esperti ENEA hanno partecipato anche alle riunioni dei due nuovi Gruppi di Lavoro creati nel 2011 all'interno dell'59/61G specificamente per il rumore e per discutere i temi dell'accessibilità a questo apparecchi domestico per le persone con diverso grado di disabilità.

In ambito mondiale ENEA ricopre dal 2003 la carica di Segretario del SC 59D *Home laundry appliances* della IEC il cui scopo è definire metodi di misura di valore globale per lavatrici, asciugatrici e lavasciugatrici. I risultati ottenuti da questo SC nel periodo ottobre 2011-settembre 2012 sono:

- "Corrigendum 1 - Clothes washing machines for household use - Methods for measuring the performance" in cui viene corretto un errore nel dosaggio del detersivo riscontrato nello standard IEC 60456 Ed. 5, pubblicato nel settembre 2011
- Asciugatrici: IEC 61121 Ed. 4 Tumble dryers for household use - Methods for measuring the performance, pubblicata nel febbraio 2012
- Lavasciugatrice: la prima versione dello standard mondiale è al voto finale da parte dei paesi membri che dovranno esprimersi sulla bozza di standard entro la prima settimana di settembre
- Acqua standard per le prove di laboratorio: IEC 60734 Ed. 2 Household electrical appliances - Performance - Water for testing, giugno 2012.

Aggiornamento della rete dei laboratori

Le misure di implementazione di ecodesign ed etichettatura hanno bisogno di una efficace azione di sorveglianza del mercato da parte degli Stati, per garantire la conformità dei prodotti e quindi proteggere il consumatore e l'ambiente.

L'ENEA, ha supportato sino dal 2010 la creazione di una rete di laboratori sul territorio nazionale che possano realizzare le verifiche di conformità previste dalla legislazione comunitaria. L'attenzione si è concentrata dapprima sugli apparecchi per la refrigerazione domestica e sui forni elettrici, e successivamente, nella precedente annualità sugli apparecchi del lavaggio (lavatrici e lavastoviglie) che sono il secondo più importante gruppo di apparecchi domestici installati nelle case. A questo proposito in questa annualità è stato circolato uno specifico questionario per raccogliere le informazioni sulla capacità di prova e le caratteristiche dei laboratori per i test sulle lavatrici.

Il rapporto finale [RdS/2012/075], contenente l'elenco di laboratori contattati e le specifiche caratteristiche, tipo di apparecchi su cui è possibile eseguire test, capacità di prova e riferimenti, è disponibile sul sito ENEA.

Una descrizione dettagliata dei risultati ottenuti è contenuta nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/074 Sviluppo di nuovi metodi di misura e implementazione nazionale della legislazione europea sull'etichettatura e i requisiti minimi di efficienza energetica
- RdS/2012/075 Rapporto sui risultati delle azioni svolte per la sorveglianza delle apparecchiature e sui laboratori di riferimento
- RSE/2012/112 I laboratori per la market surveillance sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica per gli elettrodomestici del lavaggio

B. Promozione della microcogenerazione in un contesto di micro-rete attiva per applicazioni nel settore civile

Le attività del presente macro-obiettivo si sono concentrate sulle problematiche inerenti la diffusione della microcogenerazione, in particolare con la FIRE (Federazione Italiana Risparmio Energetico) si è analizzata la rilevanza delle stesse nell'attuale contesto energetico italiano, sia come composizione del parco di generazione elettrica, che come operatività delle facilitazioni fiscali che infine come ruolo dall'industria manifatturiera nazionale. L'individuazione delle principali barriere alla diffusione e delle possibili linee per superarle si è basata sulle conoscenze delle specificità nazionali riguardo all'installazione, gestione e manutenzione di piccoli impianti presso utenti del settore residenziale e dei servizi. La validazione dei benefici e dei costi, diretti ed indiretti, è stata presentata come lo strumento propedeutico alla valutazione economica dell'intera operazione microcogenerazione. Il quadro è poi stato discusso con gli operatori della microcogenerazione, concentrandosi sui temi del mercato, della legislazione e delle prospettive. Grazie al dialogo con gli operatori è stato possibile anche validare le stime sull'attuale mercato in termini di macchine offerte e di volumi totali di vendita.

Contemporaneamente, e in collaborazione con il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino è stato svolto un lavoro di modellizzazione focalizzato sulle unità di potenza elettrica inferiore ai 10 kW.

La prima fase del lavoro ha riguardato l'acquisizione dei principali parametri energetici di sistemi di microcogenerazione[15] con motore a combustione interna di piccolissima taglia (1-6 kW elettrici), sia relativamente ad apparecchi installati sul territorio nazionale opportunamente strumentati, sia attraverso le specifiche tecniche fornite dai costruttori. Inoltre, sono state analizzate le reali prestazioni energetiche di diverse pompe di calore presenti sul mercato, sia del tipo ad azionamento elettrico, sia GHP, ovvero una tecnologia piuttosto innovativa e ancora poco diffusa sul territorio caratterizzata da sistemi a pompa di calore alimentati da motori endotermici a gas di piccolissima taglia (5-6 kW).

I dati così acquisiti sono stati impiegati per la messa a punto e l'ottimizzazione del modello dinamico di cogeneratore di piccola taglia (100-500 kWel) sviluppato nell'ambito della precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico (PAR 2008-2009), per renderlo idoneo alla simulazione di sistemi di microcogenerazione (1-6 kWel). Inoltre, il modello di unità di microcogenerazione così sviluppato è stato impiegato per la realizzazione di un ulteriore programma, volto alla simulazione e alla previsione del funzionamento orario e dei principali indici di efficienza energetica di una unità a pompa di calore a gas di piccolissima taglia, validato sulla base dei dati sperimentali precedentemente acquisiti.

[15] Per motivi di riservatezza nei confronti delle aziende costruttrici di seguito indicati con Unità-1/..4.

Tali studi sono la base fondamentale per avvalorare, o meno, le opportunità che una diffusione capillare di sistemi di micro-poligenerazione diffusa può offrire sul territorio nazionale, e per valutare quali siano oggi gli ostacoli che tali tecnologie incontrano per potersi affermare come valide e sostenibili alternative ai grandi impianti di generazione termoelettrica. Le prestazioni e i rendimenti che tali sistemi di piccolissima taglia hanno sono probabilmente oggi il maggiore ostacolo alla loro diffusione, unitamente ai costi di realizzazione di tali impianti. Solo con l'analisi dettagliata del funzionamento di tali sistemi, e tramite opportuni modelli di simulazione tarati e validati su installazioni reali, è possibile approfondire tali tematiche, e capire quali adempimenti normativi possano costituire un elemento a favore dello sviluppo di questa tecnologia, e con che ricadute sui bilanci energetici ed emissivi del territorio.

Analisi del mercato

L'analisi svolta ha indicato una situazione con molti chiari e molti scuri. Da una parte gli impianti di cogenerazione di grande taglia stanno sostituendo nel mercato gli impianti per sola produzione elettrica, a causa degli alti prezzi del gas che rendono la loro elettricità più economica e per la priorità al dispacciamento. Ciò ha portato la penetrazione della cogenerazione (anche ad alto rendimento) a percentuali importanti, che insieme alle condizioni di mercato - ed in particolare all'eccesso di offerta nella generazione elettrica – non giustificano programmi di supporto consistenti per la microcogenerazione. Dall'altra parte la presenza industriale italiana per la realizzazione degli impianti di microcogenerazione è ridotta, venendo a mancare un attore fondamentale nella spinta allo sviluppo di un quadro regolatorio e di modelli di business adatti allo sviluppo della microcogenerazione.

L'analisi del mercato e le interviste hanno indicato un mercato ancora attivo per le taglie piccole, limitatamente a particolari situazioni locali, e delle decine di kW, specie nel settore terziario, ove sia gas che elettricità sono più cari che in altri paesi. La scelta della cogenerazione permette di accedere ad una riduzione della fiscalità, situazione assente in altri Paesi europei, e quindi di avere un bilancio economico positivo.

Il settore del riscaldamento degli edifici è in Italia poco attrattivo sia per la breve durata del riscaldamento stesso sia per l'impossibilità dell'autoconsumo dell'elettricità nei condomini. Il settore dei piccolissimi impianti, molto interessante in Europa con presenza anche di multinazionali italiane, non mostra invece in Italia molte prospettive perché la complessità dei processi per formalizzare l'impianto, accedere alla defiscalizzazione ed agli incentivi ha costi e richiede risorse di un livello non congruo per apparati che si vorrebbe diffondere come elettrodomestici familiari. Si ha così una situazione di applicazioni sparse, che richiedono sforzi rilevanti agli operatori; non riuscendo a fare sistema non ci sono prospettive ravvicinate di creare un contesto di rapida diffusione allargata, a meno che non partano modelli di business collegati a sinergie commerciali fra i fornitori di energia elettrica e soprattutto gas e le ESCO attive nel settore della cogenerazione.

Per una soluzione positiva sarebbe comunque utile una forte iniziativa di semplificazione, oltre al formarsi di un interesse produttivo industriale che, con la propria catena di vendita possa fare massa critica e superare le barriere.

Per finire sarebbero utili due tipi di misure a carattere nazionale:

- la prima, mutuata dall'esperienza dell'Emilia-Romagna tesa a equiparare la cogenerazione alle soluzioni accettate per l'obbligo delle rinnovabili nelle nuove abitazioni (ed eventualmente nelle ristrutturazioni importanti). Una misura a costo zero che semplicemente consentirebbe alla soluzione di combattere ad armi pari con rinnovabili ed altre soluzioni;
- la seconda è quella di rilanciare il progetto pilota del mai attuato D.M. 3 novembre 2004. Ciò consentirebbe di finanziare la realizzazione di progetti monitorati nelle prestazioni e nelle emissioni che consentirebbero di ingegnerizzare le soluzioni cogenerative per quegli ambiti ritenuti più promettenti nei diversi settori. I risultati aiuterebbero inoltre le Regioni e gli Enti Locali a stabilire i giusti limiti antiinquinamento e a modificare i propri atti per promuovere o meno la microcogenerazione a seconda delle performance potenziali per il proprio territorio.

Linee guida per il dimensionamento e gestione

Usualmente un impianto di microcogenerazione è esercito sulla base della domanda di calore, per motori di piccola taglia non dotati di inverter è conveniente operare alla potenza massima nominale perché la modulazione porta a una riduzione del rendimento elettrico. Nel contempo occorre anche evitare frequenti spegnimenti ed accensioni per ridurre le perdite dei transitori; questi due obiettivi sono raggiungibili più o meno facilmente in funzione sia della quota del fabbisogno termico coperta dalla cogenerazione sia della possibilità dell'utenze di assorbire calore senza immediate variazioni di temperatura, cioè dalla capacità termica del carico, alta per piscine e per edifici con murature spesse, bassa per edifici leggeri o per reti di ACS senza specifici serbatoi per accumulo.

La produzione elettrica non auto consumata può essere immessa in rete e consumata in altri momenti (per potenze fino a 200 kW per le quali è attivo lo scambio sul posto), su una base puramente economica legata al prezzo nelle diverse ore. Su queste premesse si può dire che il piccolo impianto tende a comportarsi in maniera opportunistica secondo le sue necessità, ricorrendo alla rete elettrica sia per scaricare i suoi superi, sia per prelevare i propri bisogni. Questa modalità è favorita e rafforzata dalla rigidezza della normativa sia fiscale sulle accise sia relativa all'allacciamento e all'uso della rete, che in passato - e ancora oggi nella mentalità di molti funzionari provenienti dall'esperienza dei monopolisti - tendeva a considerare i piccoli impianti come un fastidio da dover sopportare con il minimo di incombenze. Se la presenza della micro generazione, sia da fonti rinnovabili che da cogenerazione, sarà sempre più rilevante si porrà il problema di una revisione delle norme e delle regole tale da favorire una maggiore integrazione ed affidabilità. È questo il tema delle smart grid che sta muovendo i suoi primi passi e dovrà trovare le regole e le tecnologie per premiare l'efficienza globale e la flessibilità vista con affidabilità del servizio.

Le macchine con inverter si prestano invece a un funzionamento a inseguimento del carico elettrico, che le rende teoricamente adatte ad operare in supporto alla regolazione e alla stabilità della rete se inserite in una rete intelligente con dispacciamento da parte del distributore[16]. In futuro tali applicazioni potranno avere un loro spazio se le regole del sistema elettrico verranno modificate per tenere conto delle esigenze collegate alla crescita delle fonti non programmabili e del cambiamento del mix produttivo del parco centralizzato.

Superata la fase della dimostrazione della funzionalità, rivisti in modo più razionale i costi del dispacciamento e di come addebitarlo a chi li produce, non solo ai consumatori come oggi, ristrutturate le reti in modo che anche ai piccoli impianti arrivino i segnali di costo sul mercato della fornitura di energia e di capacità di offerta, in modo che possano partecipare al sistema, la microcogenerazione potrà uscire dalla sua nicchia protetta e dare, a pieno titolo il suo contributo alla sostenibilità del sistema energetico.

Dall'analisi di cinque diversi impianti di microcogenerazione per i quali sono stati raccolti dati strumentali delle prestazioni in esercizio si possono trarre conclusioni di validità generale. Gli impianti realizzati nelle piscine hanno potuto usufruire dell'esperienza passata, ormai trentennale, con più di cento impianti in funzione; queste applicazioni oggi sono in grado di utilizzare le liberalizzazioni avvenute per lo scambio sul posto e per i SEU, sistemi efficienti di utenza. Le applicazioni nel settore residenziale stanno muovendo i primi passi e quindi scontano le difficoltà tipiche di una tecnologia che entra in un nuovo settore di utenza, in cui attualmente è possibile utilizzare l'energia elettrica solo per i consumi comuni.

La prima evidenza è che l'ottenimento di un elevato fattore di carico degli impianti richiede una stretta collaborazione fra la ESCO e l'utente. Una collaborazione che deve nascere all'atto del dimensionamento e del progetto dell'impianto, in modo da garantire un funzionamento in condizioni ottimali e il massimo numero di ore di esercizio, e deve poi proseguire per assicurare la migliore gestione e validare l'impianto, che può fornire utili indicazioni alla ESCO per le realizzazioni successive. La ESCO deve inoltre aiutare l'utente finale a evitare possibili problemi di rumorosità e vibrazioni, che possono portare a un funzionamento forzato a ore ridotte o alla necessità di investimenti aggiuntivi con relativi fermi impianto. Il cliente affronta una scelta importante e la sua soddisfazione, che non può che passare da un full service di qualità e dal rispetto delle condizioni contrattuali, è importante in questa fase iniziale del mercato per favorire la diffusione per passaparola. Per garantire i migliori risultati può essere necessario prevedere tempi più lunghi per i contratti, con bonus da subito per l'utente, mantenendo un margine per superare le difficoltà che possono nascere nell'esercizio.

La seconda evidenza è che siamo ad applicazioni prototipali, non tanto per i motori, quanto per il loro inserimento nel mercato nazionale e i conseguenti aggiustamenti relativi al package, al collegamento con le utenze e alla regolazione e gestione delle macchine. Non esiste ancora una banca dati affidabile sulle tipologie, potenze, produzioni e durata dei vari impieghi della microcogenerazione nel settore residenziale e del terziario, sulla quale basare un progetto di intervento che preveda risposte organiche ed organizzate alle più prevedibili difficoltà che può incontrare la diffusione di una nuova soluzione tecnologica che preveda di affrontare in modo integrato attività prima disgiunte. Le varie ESCo che affrontano questi rischi dovrebbero trovare il modo di mettere a fattor comune le esperienze che stanno acquisendo e le lezioni che imparano dai problemi e dagli eventuali fallimenti: infatti se la tecnologia supera le barriere la penetrazione nel mercato potrebbe accelerare nonostante la crisi, altrimenti il rischio è di rallentamenti che potrebbero rivelarsi fatali lasciando spazio ai potenziali concorrenti (caldaie a condensazione, pompe di calore, caldaie a biomasse).

La terza evidenza è che per ridurre i costi d'installazione della microcogenerazione occorre che gli ausiliari, dai compressori del metano ai silenziatori dagli scarichi, agli smorzatori di vibrazioni dei tubi, alle protezioni

[16] In accoppiamento con un sistema di accumulo termico, per mantenere elevato il recupero di calore e il PES delle macchine.

antincendio, siano inglobati nel sistema dal fornitore iniziale, che l'installatore possa sceglierli da catalogo e premontarli. Questo sviluppo è difficile se il produttore del cogeneratore è lontano e non ha interessi vitali nel nostro mercato finché i numeri delle installazioni rimangono bassi. Il tema del rumore, dalle vibrazioni a bassa frequenza fino ai fischi ad alta frequenza, appare come quello più importante e più difficile da affrontare, richiede la raccolta di molti casi di studio, la disponibilità di stazioni di prova, la preparazione di guide e la selezione di buone pratiche da diffondere.

In base a queste considerazioni sembrerebbe prioritario che, nell'ambito delle attività della Ricerca di Sistema Elettrico o della promozione delle smart grid o della promozione dei TEE, gli Enti di Ricerca avviino attività capillari di monitoraggio delle applicazioni, sviluppino metodi a basso costo di acquisizione di dati, preparino linee guida alla progettazione ed alla gestione ed altre attività finalizzate a valorizzare i risultati e le lezioni di questi primi interventi, portati avanti con molto coraggio ma in forma molto dispersa, col rischio che i risultati delle singole esperienze non vengano strutturati in una conoscenza condivisa.

Sarebbe molto utile per la microcogenerazione un programma di incentivazione per progetti pilota, che copra le spese per installare sistemi di monitoraggio e sperimentare sistemi di riduzione del rumore e delle vibrazioni. Il D.M. 3 novembre 2004 avrebbe dovuto rispondere proprio a questa esigenza, ma non è mai stato attuato.

Per favorire lo sviluppo della microcogenerazione sarebbe utile una semplificazione di alcune delle regole sulle autorizzazioni e la burocrazia legata alla gestione, visto che certi adempimenti hanno un costo alto in termini relativi, soprattutto considerando i motori di taglia più piccola.

Un'innovazione regolatoria interessante, specie per il residenziale, sarebbe la definizione di sistemi di produzione e consumo complessi caratterizzati dalla presenza di più utenti sottesi al medesimo punto di connessione (reti 1-n), che consentirebbe di promuovere al meglio la diffusione di applicazioni di generazione distribuita correttamente dimensionate nel settore residenziale e in particolare nei condomini.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nei seguenti deliverable:

- RdS/2012/083 Analisi del mercato della microcogenerazione in Italia con riferimento a dimensionamento, performance e gestione
- RdS/2012/076 Analisi teorico – sperimentale di sistemi di microcogenerazione

Nel seguito viene illustrata con maggiori dettagli l'attività svolta dal Politecnico di Torino [Report RdS/2012/076].

Allo scopo di elaborare un modello di sistemi di microcogerazione di piccola taglia, da inserire nella piattaforma di progettazione ODESSE, già sviluppata nelle precedenti annualità, è stata eseguita un'acquisizione di dati provenienti da sistemi commerciali installati sul territorio nazionale (1-6 kW elettrici) .

- *Acquisizione dati da sistemi di microcogenerazione commerciali*

Elaborazioni dati Unità-1

Nel presente capitolo vengono riportati i dati relativi ad un primo modello di cogeneratore di piccolissima taglia (5,0 kW_{el}) con motore a combustione interna, nel seguito identificato come Unità-1. I dati relativi a tale sperimentazione, effettuata da un istituto di ricerca nazionale, sono stati analizzati nel dettaglio. I dati grezzi, campionati con una frequenza di un dato al secondo, sono stati trattati in collaborazione con ENEA in modo da estrarre un dato per ogni ora di funzionamento. I dati così ottenuti sono riportati in Tabella 49.

I dati di funzionamento dell'unità Modello-1 sono stati richiesti anche direttamente al produttore, il quale ha informato che nelle loro unità non è prevista modulazione del carico, ma esse sono concepite e progettate per funzionare sempre a punto fisso, e pari al punto nominale. Tali dati sono riportati in Tabella 50.

Tabella 49. Elaborazione dati Unità-1 su base oraria

Ora	Potenza Termica recuperata [kW]	Potenza del gas in ingresso al cogeneratore [kW]	Potenza elettrica CHP [kW]	Rendimento elettrico	Rendimento termico	EUF
0	0,0	0,0	0,0	0	0	0
1	0,0	0,0	0,0	0	0	0
2	0,0	0,0	0,0	0	0	0
3	0,0	0,0	0,0	0	0	0
4	0,0	0,0	0,0	0	0	0
5	1,5	0,0	0,0	0	0	0
6	12,0	19,3	5,3	27,4%	62,0%	89,4%
7	12,5	19,8	5,3	26,6%	63,1%	89,7%
8	12,3	19,8	5,3	26,5%	61,8%	88,4%
9	12,2	19,8	5,3	26,9%	61,5%	88,5%
10	13.5	18.2	5.3	29.2%	74.4%	103.5%
11	12,7	19,8	5,3	26,8%	64,1%	90,9%
12	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
13	12,4	19,3	5,4	28,1%	64,4%	92,5%
14	11,6	19,3	5,3	27,5%	60,2%	87,7%
15	0,0	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
16	12,1	19,3	5,4	28,0%	62,5%	90,5%
17	12,4	19,9	5,3	26,5%	62,5%	89,0%
18	11,1	19,3	5,4	27,9%	57,7%	85,6%
19	0,0	0,0	0,0	0	0	0
20	12,7	19,9	5,4	27,1%	64,2%	91,3%
21	11,7	19,3	5,3	27,5%	60,8%	88,3%
22	12,5	19,8	5,3	27,0%	63,0%	90,0%
23	11,7	19,2	5,4	27,9%	60,9%	88,8%
24	0,0	0,0	0,0	0	0	0
MEDIA	12,1	19,6	5,3	27,3%	62,0%	89,3%

Tabella 50. Dati nominali di funzionamento forniti dal produttore

Grandezza	Dato del produttore
Potenza elettrica [kW]	5,0
Potenza introdotta con il combustibile [kW]	19,6
Potenza termica totale con condensatore fumi a 60°C [kW]	14,6
Rendimento elettrico [%]	26
Rendimento termico con condensatore fumi a 60°C [%]	74
Efficienza globale [%]	100

Elaborazioni dati Unità-2

Un ulteriore set di dati analizzato è quello relativo alle prove condotte dall'RSE (Milano) su un'altra unità di microcogenerazione con motore a combustione interna da 6,0 kW_{el}, nel seguito identificata come Modello-2. Tale attività è descritta all'interno del Rapporto Cesi "*Caratterizzazione e valutazione delle prestazioni di cogeneratori di piccola taglia*" del 31/03/2011. La macchina è stata testata nella modalità di funzionamento ad inseguimento termico ed è stata connessa alla rete di generazione distribuita di RSE. La sperimentazione è stata condotta per un arco temporale di circa 4 mesi, durante la stagione invernale. Sono stati forniti tre set di dati per tre diverse temperature dell'acqua in ingresso al cogeneratore, (55, 60 e 65°C)., La sintesi delle grandezze rilevate durante le prove è riportata in Tabella 51.

Tabella 51. Dati sperimentali Unità-2 forniti dall'RSE

T acqua ingresso CHP (°C)	% carico	Potenza elettrica (kW)	Potenza termica (kW)	Potenza gas (kW)	Potenza gas corretta (kW)	Rend. elettrico	Rend. termico	EUF
55	50,0%	3,0	8,8	17,1	17,9	16,8%	49,4%	66,2%
55	48,3%	2,9	9,1	17,0	17,7	16,4%	51,4%	67,8%
55	63,3%	3,8	10,2	19,2	20,0	19,0%	51,1%	70,1%
55	78,3%	4,7	10,5	20,3	21,2	22,2%	49,7%	71,9%
55	78,3%	4,7	10,8	21,4	22,3	21,1%	48,4%	69,5%
55	86,7%	5,2	11,1	22,0	22,9	22,7%	48,6%	71,3%
55	100,0%	6,0	11,6	23,2	24,2	24,8%	48,0%	72,8%
55	100,0%	6,0	11,5	23,5	24,5	24,5%	46,9%	71,4%
60	50,0%	3,0	8,5	17,0	17,7	17,0%	48,3%	65,3%
60	50,0%	3,0	8,5	16,3	17,0	17,6%	50,2%	67,8%
60	63,3%	3,8	9,8	19,2	20,0	19,0%	49,2%	68,2%
60	78,3%	4,7	10,2	20,1	21,0	22,4%	48,5%	70,9%
60	80,0%	4,8	10,3	21,0	21,9	21,9%	46,9%	68,8%
60	88,3%	5,3	10,8	22,1	23,0	23,0%	47,0%	70,1%
60	100,0%	6,0	11,5	23,3	24,3	24,7%	47,3%	72,0%
60	100,0%	6,0	11,2	23,5	24,5	24,5%	45,6%	70,1%
65	50,0%	3,0	8,2	16,8	17,5	17,1%	47,0%	64,1%
65	50,0%	3,0	8,3	16,2	16,9	17,7%	49,0%	66,8%
65	63,3%	3,8	9,5	19,2	20,0	19,0%	47,5%	66,5%
65	78,3%	4,7	9,8	20,1	20,9	22,5%	46,9%	69,3%
65	78,3%	4,7	10,1	21,1	22,0	21,4%	45,9%	67,3%
65	86,7%	5,2	10,2	21,4	22,3	23,3%	45,8%	69,1%
65	100,0%	6,0	10,6	23,4	24,4	24,6%	43,4%	68,0%
65	100.0%	6,0	10,9	23,3	24,3	24,7%	44,7%	69,4%

Anche per quest'unità di microcogenerazione, sono stati richiesti direttamente al produttore i dati nominali di funzionamento, che vengono riportati di seguito in Tabella 52

Tabella 52. Dati nominali di funzionamento Unità-2 forniti dal produttore

Grandezza	Dato del produttore
Potenza elettrica [kW]	6.0
Potenza introdotta con il combustibile [kW]	20,8
Potenza termica totale con condensatore fumi a 60°C [kW]	11,7
Rendimento elettrico [%]	28,5
Rendimento termico con condensatore fumi a 60°C [%]	57
Efficienza globale [%]	85,5

Elaborazioni dati Unità-3

Un ulteriore set di dati sperimentali, fornito da ENEA, è relativo all'unità di microcogenerazione con motore a combustione interna da 5.6 kW_{el}, identificata come Unità-3. I test realizzati in seno a tali prove sono caratterizzati complessivamente 6 prove, a 3 diversi livelli di potenza elettrica: 0,9; 3,1 e 5,6 kWel circa. Lo scopo delle prove è quello di valutare l'operatività ai regimi parziali sui rendimenti termico e elettrico. Per ogni livello di potenza elettrica sono stati inoltre condotti due esperimenti con due diversi valori di portata di acqua di raffreddamento (rispettivamente 0,29 e 0,18 L/s).

Le prove sperimentali realizzate sono elencate in Tabella 53. Per ogni prova, sono indicate la potenza elettrica netta, la portata d'acqua di raffreddamento, e i valori minimo e massimo della temperatura dell'acqua di raffreddamento in ingresso al motore. Un esempio delle elaborazioni condotte è riportato in Figura 227.

Tabella 53. Elenco delle prove sperimentali effettuate

Test number	Data (gg/mm/aa)	P_{net} (kW)	$\dot{m}_{CW}$ (L/s)	$T_{cw,i,min}$ (°C)	$T_{cw,i,max}$ (°C)
1	02/11/2011	5,58	0,29	24,2	62,0
2	11/11/2011	3,15	0,29	27,6	64,5
3	07/12/2011	0,60	0,29	21,0	56,0
4	08/11/2011	5,60	0,18	26,0	57,7
5	21/11/2011	3,13	0,18	22,9	61,7
6	25/11/2011	0,58	0,18	25,4	67,1

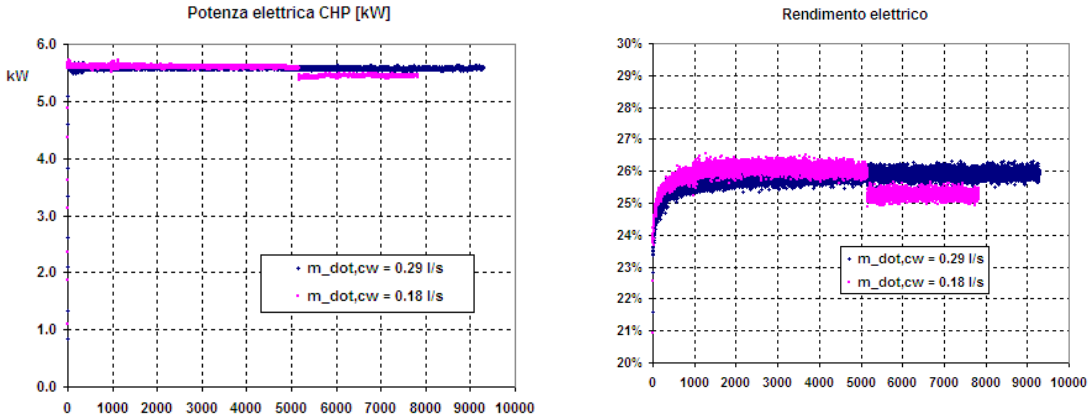


Figura 227. Potenza e rendimento elettrico relativi alle prove sperimentali a 5,6 kW

Elaborazioni dati Unità-4

I dati riportati all'interno di questa sezione sono stati forniti dal produttore dell'unità identificata come Unità-4. L'unità è un micro-cogeneratore con motore a combustione interna da 1,0 kW_{el} il quale lavora unicamente a punto fisso e pari al 100% della sua potenzialità massima. Non è previsto il funzionamento in regime parzializzato. In Tabella 54 se ne riportano i dati nominali di funzionamento.

Tabella 54 .Dati nominali di funzionamento forniti dal produttore dell'Unità-4

Grandezza	Valore
Potenza elettrica [kW]	1,0
Potenza introdotta con il combustibile [kW]	3,8
Potenza termica totale con acqua a 75°C [kW]	2,5
Temperatura dei gas di scarico	<90
Portata dei gas di scarico	1,45
Rendimento elettrico [%]	26,3
Rendimento termico [%]	65,7
Efficienza globale [%]	92,0

- *Analisi comparativa tra le Unità*

Nella presente sezione si intende effettuare un'analisi comparativa delle performance delle diverse unità oggetto di indagine. In particolare, si riportano in Figura 228 i confronti fra i rendimenti elettrici dei micro-cogeneratori analizzati. Le mappe così elaborate sono state interpolate e utilizzate, in forma adimensionale, per creare le look-up tables da inserire all'interno del programma Matlab Simulink di simulazione di cogeneratori di piccola taglia. L'interpolazione effettuata è mostrata in Figura 229.

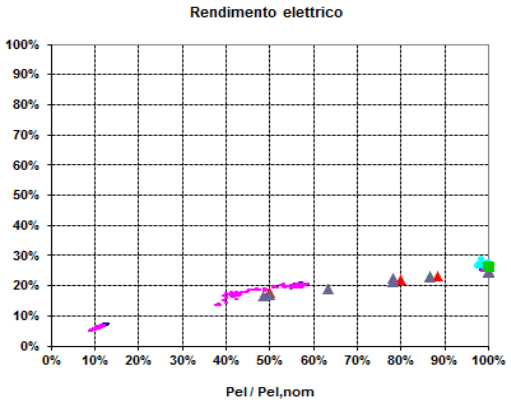


Figura 228. Analisi comparativa delle performance delle unità oggetto di indagine

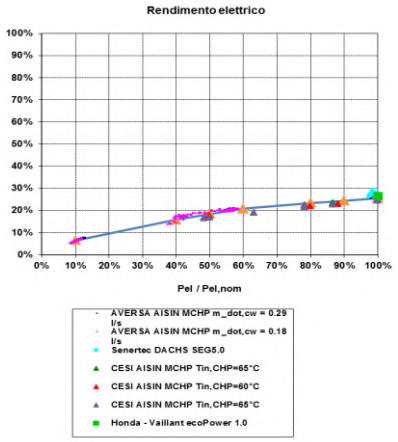


Figura 229. Interpolazione sui dati di rendimento elettrico delle unità oggetto di indagine

- *Descrizione del modello della pompa di calore a gas GHP*

Il modello integrato fra l'unità di microcogenerazione e la pompa calore, è stato sviluppato in ambiente Simulink e validato su dati reali.

L'unità GHP è costituita da un motore endotermico a gas naturale accoppiato ad una pompa di calore. Il motore endotermico provvede all'azionamento meccanico del compressore del circuito frigorifero per mezzo di una trasmissione a cinghia, mentre uno scambiatore dedicato consente di trasferire il calore recuperato dal motore e dai gas esausti al circuito frigorifero e/o alla produzione di acqua calda.

Dai dati forniti dai tecnici della casa costruttrice, si evidenziano i dati di performance riportati in Figura 230. Sono state considerate le unità aria – acqua 8-10-13-16-20-25 HP. In ascissa è riportata la potenza del combustibile introdotta nell'unità, mentre in ordinata le potenze termiche calda e fredda erogate dalla macchina, e il Gas Utilization Efficiency (GUE) complessivo. Tale coefficiente esprime il rapporto fra la potenza termica (o frigorifera) prodotta, e la corrispondente potenza del combustibile in ingresso all'unità.

Per l'unità 16 HP sono anche stati forniti i dati di funzionamento ai carichi parziali, e al variare della temperatura esterna, con i valori previsti dalla prEN 14825 per le pompe di calore a compressione elettriche, ovvero +12, +7, +2, -7 °C. per quanto concerne le temperature della sorgente calda, sono stati forniti i dati relativi ai seguenti due punti di funzionamento:

- 30 - 35 °C, poiché prescritto dalla UNI TS 11300 – 4
- 40 – 45 °C, poiché si tratta di un range di funzionamento particolarmente diffuso.

Il modello prevede i seguenti dati in input:

- temperatura ambiente (T_{amb});
- portata acqua del circuito utenza ($\dot{m}_{hu}$);
- temperatura di ritorno dell'acqua dal circuito utenza ($T_{hu,i,saa}$).

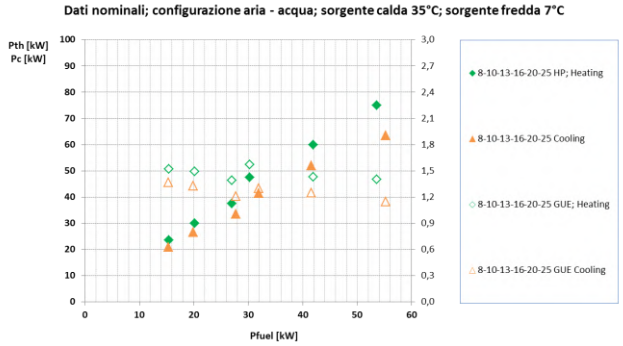


Figura 230. Performance delle unità GHP 9-10-13-16-20-25HP

Rispetto al modello di motore a combustione interna in assetto cogenerativo precedentemente sviluppato, sono state implementate le seguenti modifiche:

1. è stata inserita la mappa della potenza elettrica erogata in funzione della potenza termica del combustibile (P_{el} vs P_f); tale mappa è stata ottenuta dall'interpolazione dei dati sperimentali forniti dai produttori dei micro-cogeneratori, come illustrato nella Parte A del Rapporto Finale. In particolare, usualmente, i produttori forniscono le mappe del rendimento elettrico in funzione della potenza elettrica. Tali mappe sono facilmente riconvertibili nel formato richiesto dividendo la potenza elettrica fornita per il relativo rendimento elettrico; si calcola in tal modo la potenza termica del combustibile, che può essere inserita nell'apposita look-up table, in funzione della potenza elettrica; la mappa della potenza elettrica è stata quindi adimensionalizzata rispetto alla potenza elettrica e potenza termica del combustibile nominali;
2. è stato inserito il modello di pompa di calore;
3. la caldaia è stata rimossa;
4. è stato mantenuto l'accumulo di energia termica sotto forma di acqua calda, con un set-point di temperatura interna impostabile dall'utente, e due temperature minima e massima di off-set per definire l'azionamento e lo spegnimento dell'unità GHP.

Il modello sviluppato prevede la gestione della GHP in assetto di riscaldamento. La potenza termica recuperata dal motore a combustione interna, viene considerata come potenza termica utile in ingresso all'accumulo, e concorre al mantenimento della temperatura di set-point al suo interno. La potenza meccanica sviluppata invece dal motore viene inviata, per mezzo di un rendimento meccanico di trasmissione, al compressore della pompa di calore, simulandone in questo modo l'assorbimento. Quando l'unità GHP è spenta, essa non eroga né potenza meccanica, e quindi non aziona il compressore della pompa di calore, né potenza termica.

Lo schema funzionale dell'integrazione fra il modello di cogeneratore, e quello della pompa di calore, è mostrato in Figura 231.

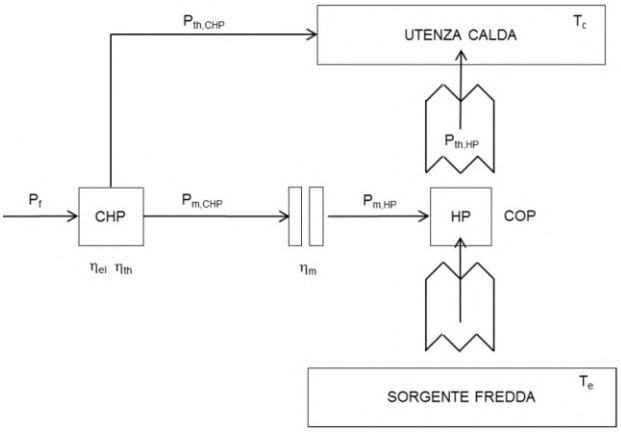


Figura 231. Schema funzionale dell'integrazione fra cogeneratore e pompa di calore

Le equazioni fra le grandezze che intervengono nelle trasformazioni termodinamiche, implementate all'interno del modello della GHP, sono di seguito riportate:

$$P_{m,HP} = \eta_m P_{m,CHP}\,; P_{th,HP} = COP\, P_{m,HP}\,; P_{th,tot} = P_{th,HP} + P_{th,CHP}\,; \qquad P_{th,CHP} = P_f * \eta_{th}\,;$$

$$GUE = P_{th,HP} / P_f$$

Il controllo dell'unità è rappresentato dall'inseguimento termico, ovvero la funzione obiettivo è il mantenimento di una temperatura di set-point prefissata all'interno dell'accumulo, con un off-set di temperature minime e massime ammesse impostabili dall'utente. Raggiunta la temperatura massima, l'unità GHP si spegne, e rimane spenta fino a quando la temperatura dell'accumulo non raggiunge il valore minimo impostato dell'utente, dopo di che si riaccende e la potenza termica totale erogata dalla macchina riprende a conferire nell'accumulo.

Il modello di GHP illustrato ai capitoli precedenti è stato validato per mezzo dei dati sperimentali forniti dal produttore dell'unità. Sono state condotte due simulazioni, sui dati nominali delle unità 8HP e 10 HP, le più vicine come taglie a quelle considerate nell'ambito della presente ricerca. I risultati delle due prove condotte sono riportate in Tabella 55.

Tabella 55. Validazione del modello sui dati nominali unità 8HP e 10HP

	Dati di targa		Dato produttore	Dato simulato	Discrepanza
Modello	P_m [kW]	P_f [kW]	$P_{th,tot}$ [kW]		%
8HP	5	15,5	23,5	23,7	+0,9
10HP	6,5	20,1	30	30,7	+2,3

dove $P_{th,tot} = P_{th,HP} + P_{th,CHP}$ è la potenza termica totale resa all'acqua, in uscita dalla pompa di calore. Si nota come l'aderenza dei dati simulati ai dati forniti dal produttore sia molto buona.

Dopo aver effettuato la validazione del modello con i dati sperimentali forniti dal produttore, nel presente paragrafo si intende illustrare i risultati di un esempio di simulazione. E' stato testato il funzionamento del modello dell'unità GHP nell'ipotesi di fornire acqua calda per riscaldamento ad un edificio, che è stato simulato come un carico termico costante, di valore impostabile dall'utente. La temperatura all'interno dell'accumulo mostra il trend riportato in Figura 232 in cui si nota il mantenimento della temperatura di set-point con gli offset di temperatura minima e massima impostati dall'utente.

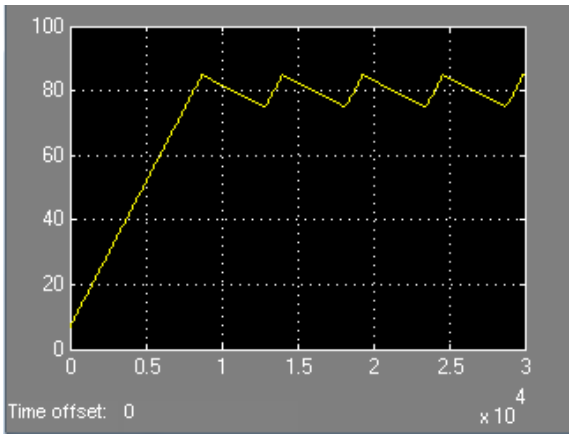


Figura 232. Andamento della temperatura all'interno dell'accumulo termico [°C]

Dal momento che il modello calcola i capisaldi del ciclo frigorifero, è possibile tracciarlo nel diagramma p-h. Si riporta tale ciclo in Figura 233.

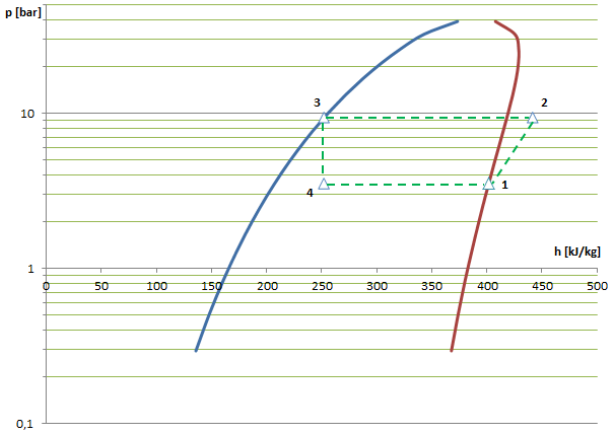


Figura 233. Ciclo di lavoro del fluido frigorigeno nel diagramma p-h

Le attività della FIRE nell'ambito di questo obiettivo, in particolare, si sono focalizzate sull'analisi del mercato della microcogenerazione con riferimento a dimensionamento, prestazioni e gestione [Report RdS/2012/083].

- *Analisi del mercato*

Dalle stime delle due associazioni di categoria Cogena e Italcogen, che raggruppano produttori, importatori e installatori attivi nel settore della cogenerazione, nel 2011 sono stati installati circa 200 microcogeneratori, con una lieve crescita rispetto all'anno precedente.

La maggior parte delle macchine è stata installata in Emilia-Romagna, dove la DGR 1366 del 2011 equipara l'energia risparmiata da impianti cogenerativi particolarmente efficienti all'energia rinnovabile per il soddisfacimento dei fabbisogni delle nuove costruzioni. La Regione Emilia-Romagna ha circa 2 milioni di unità immobiliari. Di queste 320.000 circa sono state oggetto di certificazione energetica fra il 2009 e metà 2012 e sono state censite nell'apposito catasto edifici. Dai dati tratti dal catasto citato (2010-2012): sono 700 le unità immobiliari servite da un impianto di microcogenerazione (in tutto risultavano censiti 102 impianti a metà 2012)[17]. In Figura 234 sono riportati gli impianti attivi in Emilia Romagna distinti per anno di attivazione e per taglia.

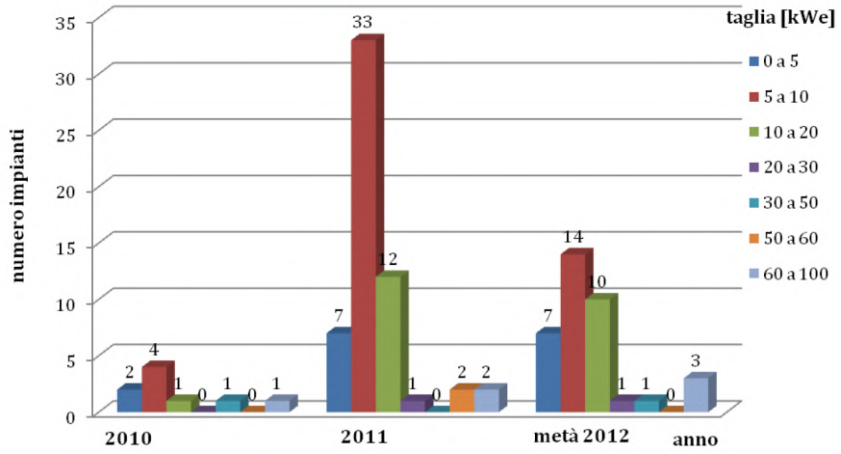


Figura 234. Impianti attivi in Emilia-Romagna distinti per anno di attivazione e taglia

Sta nascendo anche l'interesse verso impianti di microcogenerazione alimentati a biogas, grazie all'interessamento di Coldiretti e alla spinta della forte incentivazione rappresentata dalla tariffa omnicomprensiva[18].

Il mercato della microcogenerazione in Italia è quasi esclusivamente rappresentato da motori alternativi a combustione interna. Sono commercialmente disponibili una sola microturbina e un solo motore Stirling. A proposito di Stirling, sono stati installati anche una ventina di cogeneratori integrati in caldaie murali, disponibili sul mercato europeo, ma non ancora distribuiti sul territorio nazionale.

La fascia di potenza sopra i 50 kW e fino a 200 kW presenta nel 2011 all'incirca la stessa quantità di macchine installate. Oltre la metà – soprattutto quelle entro i 100 kW, quindi collegabili in bassa tensione – è stata utilizzata per mini reti di teleriscaldamento sviluppate da multiutility ed ESCO, sfruttando i vantaggi fiscali che vengono estesi anche al gas utilizzato nelle caldaie di integrazione (e nelle zone climatiche E e F anche gli sgravi fiscali previsti per gli allacciamenti).

Considerando tutte le macchine fino a 200 kW sono state installate in Italia nel 2011 circa 400 unità, che rappresentano una nicchia rispetto alle decine di migliaia di caldaie a basamento installate ogni anno e che almeno in parte potrebbero essere sostituite da cogeneratori.

Il mercato europeo della microcogenerazione è decisamene vivo e nel 2011 ha superato le 5.000 unità. Si può notare una presenza non marginale degli Stirling che hanno rafforzato la loro posizione nel 2010 e sono arrivati a competere come numero di unità con i motori alternativi a combustione interna nel 2011. Il mercato europeo nel 2011 è costituito principalmente da Germania e Regno Unito. È interessante considerare le stime di vendita del resto del mondo, non solo perché mostrano che il mercato nel 2011 ha fatto un grosso passo avanti, arrivando a sfiorare le 30.000 unità, ma anche perché quasi tutto il resto del mondo è rappresentato dal mercato

[17] Va notato che gli impianti in funzione potrebbero essere di più, in quanto non sono presenti nel catasto alcuni impianti collegati a certificazioni effettuate nel 2009 e quelli eventualmente esistenti e non collegati a immobili certificati.

[18] Almeno fino all'entrata in vigore del D.M. 6 luglio 2012 che ridefinisce le regole per l'incentivazione e l'entità degli incentivi.

giapponese[19]. Il Giappone dopo un lungo dominio del generatore a combustione interna Ecowill, ha visto nell'ultimo biennio un deciso passo avanti delle celle a combustibile.

- *Macchine disponibili sul mercato italiano*

Sono stati censiti i principali prodotti presenti sul mercato italiano della microcogenerazione, con alimentazione a gas naturale. All'elenco riportato in Tabella 56 sono stati aggiunti l'Ecowill, protagonista del mercato giapponese, dal 2010 distribuito in Austria e Germania, e gli Stirling Ariston e Baxi, installati sperimentalmente in Italia. Questi due Stirling si differenziano in quanto sono integrati in una caldaia murale, mentre tutte le altre macchine presenti sono a basamento. Tutte le macchine da 1 kW_e comprendono un bruciatore di integrazione (che nel caso dell'Ecowill, almeno nella versione per il mercato giapponese, è in un modulo separato che ospita anche un serbatoio di accumulo) e sostituiscono completamente la caldaia.

Tutte le macchine progettate per il mercato giapponese (Aisin, Honda e Yanmar) sono dotate di inverter. Questa caratteristica permette un maggior campo di modulazione, che va dal 5 al 100%, permettendo di funzionare in modalità di inseguimento del carico elettrico, non essendo possibile in Giappone riversare l'energia elettrica prodotta in rete. Le macchine Energifera, progettate e prodotte in Italia, sono anche esse dotate di elettronica di potenza, che utilizzano per funzionare in periodi limitati anche oltre la potenza nominale, così da poter essere ancora più flessibili nell'inseguimento del carico elettrico. L'inverter si traduce però in un aumento dei costi, non sempre giustificabile in virtù dei benefici nel nostro Paese, che non presenta vincoli di cessione alla rete, e anzi prevede lo scambio sul posto fino a 200 kW.

Anche le microturbine a gas sono dotate di inverter, ma in questo caso è una necessità dettata dall'elevatissimo regime di rotazione dell'albero. Grazie all'inverter le microturbine hanno una possibilità di regolare il carico elettrico con decadimenti di efficienza contenuti in confronto alle turbine di potenza maggiore (che operando a giri costanti evidenziano un decadimento delle prestazioni più accentuato al variare del carico).

Tabella 56. Micro-cogeneratori alimentati a gas naturale con motori Stirling e con motori alternativi a combustione interna da 1 a 50 kW e (micro)turbine da 30 a 100 kW

Fabbricante	Whispergen	Ariston	Baxi	Honda	Aisin	Yanmar	Senertec	Aisin
Nome	---	---	Ecogen	Ecowill MCH	GECC46A2	CP5	Dachs	GECC60A2
Tipologia	Stirling	Stirling	Stirling	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
$P_{elettrica}$ [kW]	1	1	1	1	4,6	5	5,5	6
$P_{termica}$ [kW]	7,5	3-24	4-40	2,5	11,7	10	12,3	11,7

Fabbricante	Yanmar	ReiCom p	ReiCom p	ecpower	Energia Nove	Energifera	ReiCom p	CPL Concordia
Nome	CP10	REC2 10	REC2 20	XRGI 20	Tandem	Tema 30-50	REC2 30	Bibloc 35
Tipologia	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI	MCI
$P_{elettrica}$ [kW]	10	11	20	20	20,3	30	31	35
$P_{termica}$ [kW]	17	25	44	40	47,52	64	60	71

Fabbricante	Energifera	RefComp	RefComp	MAN		Capstone	Capstone	Turbec
Nome	Tema 40-50	REC2 40	REC2 50	E0834		C30	C65	T100
Tipologia	MCI	MCI	MCI	MCI		TG	TG	TG
$P_{elettrica}$ [kW]	40	43	50	47		30	65	100
$P_{termica}$ [kW]	82,5	73	78	63		60	112	160

- *Indagine presso gli operatori e gli utenti*

La prima parte dell'indagine si è basata su interviste ai maggiori operatori sul mercato della microcogenerazione e alle due associazioni di categoria, Cogena e Italcogen. Gli operatori sono stati contattati non solo per avere un quadro della situazione attuale, ma anche per individuare le installazioni da poter controllare per la seconda parte dell'indagine.

I tre argomenti discussi durante le interviste sono stati: mercato, quadro legislativo e prospettive.

[19] Dove i grandi numeri si spiegano per l'interessamento diretto delle aziende del gas, che ha visto nella cogenerazione un sistema per mantenere le quote di mercato in rapida erosione per la diffusione di fotovoltaico e pompe di calore.

- *Considerazioni sul mercato*

Si lamenta una mancanza di cultura e conoscenza da parte di installatori e progettisti, che porta spesso a un primo contatto direttamente con i clienti finali interessati. Un tale approccio, del tutto naturale per applicazioni di media e piccola taglia, risulta poco conveniente per macchine di piccola taglia. Una conferma della necessità di aggiornamento e formazione degli installatori viene dalle richieste a produttori e distributori di microcogeneratori di seminari di formazione e audit energetici e studi di fattibilità preliminari per questo tipo di applicazioni.

Considerata la riduzione degli incentivi operata dal D.M. 5 luglio 2012 si nota una tendenza a sostituire parte del business sul fotovoltaico con applicazioni legate all'efficienza energetica negli usi finali in generale e alla cogenerazione in particolare. Ciò potrebbe rappresentare una buona leva per la diffusione di queste applicazioni. La cogenerazione si presenta come un naturale ponte fra la semplice generazione elettrica e gli interventi mirati alla riduzione dei consumi finali. Chiaramente passare dall'interesse all'applicazione pratica richiede l'assimilazione di conoscenze e competenze decisamente importanti, per cui diventa fondamentale la presenza di corsi di formazione e aggiornamento adeguati.

La barriera maggiore alla diffusione della microcogenerazione è la complicazione delle pratiche burocratiche. Queste risultano spropositate sia in riferimento alla costruzione - le pratiche per le macchine più piccole, assimilabili come dimensioni a quelle di una lavatrice, dovrebbero richiedere poche ore per la compilazione e non i 3-8 mesi tipici lamentati dagli operatori -, sia per la successiva gestione degli impianti, che richiede l'interessamento di operatori del settore quali venditori di energia, distributori di gas o ESCO in quanto poco adatta a un normale utente finale. I diversi soggetti sono però poco interessati a singoli interventi di microcogenerazione, in quanto i margini sono bassi sul singolo intervento, date le limitate quantità di energia prodotta. Il successo della tecnologia nel futuro dipenderà dalla capacità di creare una massa critica capace di ridurre i costi di gestione burocratici e tecnologici[20].

- *Quadro legislativo*

Il quadro legislativo e normativo attualmente in vigore, nonostante i proclami sulla semplificazione, è quello degli impianti di taglia maggiore, dal punto di vista della fiscalità, degli incentivi e delle emissioni. Per le emissioni i limiti sono gli stessi, peraltro non particolarmente bassi, degli impianti di piccola cogenerazione. Sono presenti anche vincoli a livello regionale, uno diverso dall'altro, alcuni dei quali piuttosto restrittivi[21]. Anche per gli incentivi non vi è differenza tra piccola e microcogenerazione e la fiscalità mette sullo stesso piano la micro e le centrali termoelettriche cogenerative da centinaia di MW.

La fiscalità e il riconoscimento della cogenerazione da parte del GSE richiedono nella maggior parte dei casi l'installazione di contatori tarati e certificati che possono arrivare a oltre 1.000 euro di costo, per non parlare dell'interfaccia di rete, necessaria per la connessione, che può avere un costo più che doppio. Soprattutto per le macchine più piccole da 1 kW a 20 kW l'incidenza di questi valori è molto elevata. Oltre ai costi c'è il problema degli adempimenti ricorrenti, dall'annotazione periodica sul registro di officina, se non si sceglie l'abbonamento alle accise, alla taratura del contatore elettrico ogni tre anni, al pagamento periodico delle accise, al riconoscimento ex-post della cogenerazione da parte del GSE e il rilascio dei certificati bianchi.

Il quadro, oltre a essere complesso e non particolarmente favorevole per la microcogenerazione, è anche piuttosto mutevole, come dimostrano le vicissitudini vissute fra il 2011 e il 2012 dalle condizioni applicate alla fiscalità sui combustibili.

Gli incentivi dei certificati bianchi sono troppo complessi per impianti piccolissimi, ai quali vengono riconosciuti poche centinaia di euro all'anno, che però richiedono pratiche annuali non alla portata dell'utente finale medio. La misura microcogenerazione del fondo Kyoto ha destato interesse negli operatori, ma pochi hanno poi presentato domande.

Anche la connessione alla rete, benché teoricamente semplificata quando si ha già una connessione in prelievo di potenza pari o superiore, si rivela in molti casi estenuante.

Nel caso specifico dei condomini, l'impossibilità di poter vendere l'energia elettrica direttamente ai condomini peggiora nettamente i conti economici degli studi di fattibilità, limitando la diffusione della microcogenerazione.

[20] Anche la manutenzione sulle micro macchine tende ad assumere valori proibitivi, in quanto il costo della manodopera finisce per incidere più dei componenti e dei consumabili.

[21] il che tende ad alimentare la confusione, ma è un effetto inevitabile, e per certi versi auspicabile, della sussidiarietà.

- *Prospettive*

Le direttive europee su rinnovabili e certificazione energetica dell'edilizia potrebbero stimolare il mercato delle pompe di calore elettriche, per aumentare la percentuale delle rinnovabili termiche nella copertura dei fabbisogni termici degli edifici. L'accordo raggiunto sulla direttiva sull'efficienza energetica EED non è particolarmente favorevole alla microcogenerazione.

In uno scenario di maggior diffusione delle pompe di calore elettriche però, la microcogenerazione potrebbe avere una funzione di regolazione decentrata in presenza di dispositivi adeguati.

Molti produttori e distributori di microcogeneratori offrono già vari servizi aggiuntivi come studi di fattibilità, manutenzione full service, etc. Il mercato sta evolvendo, non si venderà solo il cogeneratore, ma il servizio integrale, unica strategia possibile per macchine di questa taglia, sicuramente meno semplici da gestire di una caldaia.

Le barriere alla diffusione capillare della microcogenerazione indicate principalmente sono raggruppabili in quattro aree, con aspetti sia tecnici, sia economico/finanziari, sia di rapporti colle amministrazioni, che infine organizzativi:

1. Carenze dell'offerta
2. Confronto delle efficienze con gli impianti sostituiti
3. Confronto globale dei costi e dei vantaggi
4. Difficoltà di raggiungere alti fattori di carico.

I punti 2 e 3 dipendono dall'evoluzione del parco di generazione e delle tecnologie disponibili e fanno sì che per rimanere competitiva in un confronto generale con altre tecnologie la microcogenerazione necessita alti rendimenti elettrici, oltreché termici complessivi. I microcogeneratori e le pompe di calore sono al momento sottoposte a barriere di tipo burocratico e amministrativo che ne sfavoriscono la diffusione rispetto alle tecnologie tradizionali (caldaie e generazione elettrica di grade taglia).

Il punto 4 richiede una progettazione idonea e uno studio accurato delle possibilità di accoppiamento con accumuli termici, pompe di calore elettriche e assorbitori, mettendo in luce la necessità di personale qualificato, oltreché di miglioramenti tecnologici.

Sulla base delle valutazioni raccolte nello studio risultano tre differenti temi di ricerca e sviluppo per la promozione della cogenerazione:

- il miglioramento delle prestazioni nella conversione dell'energia del combustibile in elettricità e calore;
- la riduzione dei costi di autorizzazioni, acquisto, installazione, esercizio e manutenzione, primo avvio ed addestramento dell'utente (progetti pilota che supportino economicamente il monitoraggio;
- l'aumento del fattore di carico degli impianti.

- *Presentazione delle applicazioni*

Le applicazioni della cogenerazione in ambito civile si possono dividere nelle seguenti categorie:

- integrazione a un impianto di riscaldamento ed eventuale produzione di acqua calda sanitaria;
- integrazione a un impianto di produzione di acqua calda sanitaria;
- integrazione a un impianto di riscaldamento con pompe di calore elettriche

A queste si aggiunge l'accoppiamento con un assorbitore per l'integrazione in impianti che possano fornire freddo e caldo (e.g. climatizzazione uffici, centri commerciali, centri elaborazione dati, etc.). Questa ultima applicazione è poco diffusa per le taglie oggetto dello studio, per i maggiori costi di investimenti e le complessità impiantistiche e gestionali, per cui non viene considerata.

L'uso di un cogeneratore implica sempre la presenza di un impianto termico di integrazione/soccorso e del collegamento alla rete elettrica, questo perché i tipici fabbisogni delle utenze sono caratterizzati da picchi di potenza elettrica e soprattutto termica, per poche ore all'anno, che non renderebbero economicamente sostenibile l'investimento in una macchina in grado di soddisfare la massima richiesta elettrica e termica dell'utenza. Bisogna inoltre ricordare che i profili di assorbimento elettrico e termico potrebbero non essere in fase, ma oltre alla possibilità di prevedere accumuli termici, per macchine cogenerative ad alto rendimento (D.M. 4 agosto 2011) fino a 200 kW_e è possibile usufruire dello scambio sul posto (oltre al ritiro dedicato, poco conveniente rispetto all'autoconsumo). Gli impianti di microcogenerazione possono essere inseriti in un Sistema efficiente di utenza (SEU), ad esempio nell'ambito di un contratto di finanziamento tramite terzi, e beneficiare delle relative agevolazioni sul computo delle tariffe di distribuzione e degli oneri di sistema.

Nella Figura 235 sono riportati i PES (Primary Energy Saving) calcolati in base ai dati di targa per i microcogeneratori disponibili nel nostro Paese (sotto i 50 kW_e il requisito per l'alto rendimento è PES>0).

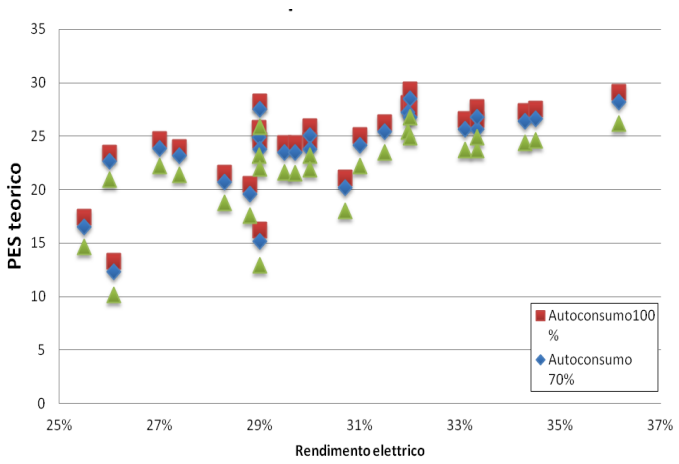


Figura 235. PES per microcogeneratori calcolato in base ai dati di targa delle macchine sul mercato

- *Descrizione delle macchine monitorate, degli schemi e delle utenze*

Nello studio sono stati analizzati cinque cogeneratori installati presso utenze del terziario e residenziali. Le applicazioni per le quali sono riportati i diagrammi di funzionamento nello studio sono le seguenti:

- Collegio a Milano, con una microturbina a gas da 65 kW_e;
- Condominio a Milano, con microturbina a gas da 100 kW_e;
- Condominio ad Alba, con un microcogeneratore alternativo da 20 kW_e accoppiato a cinque pompe di calore elettrice da 40 kW;
- Centro sportivo a Roma, con due motori alternativi con regolazione in frequenza da 90 kW_e;
- Impianti natatori pubblici a Bologna, con un motore alternativo da 75 kW_e.

Due di essi sono microcogeneratori, mentre negli altri tre casi sono motori di poco superiore alla soglia dei 50 kW_e. Il terremoto in Emilia-Romagna ha impedito di portare avanti altre indagini su applicazioni di microcogenerazione - essendosi verificato nel periodo in cui si stavano avviando le misurazioni -, ma i dati raccolti da questi cinque casi sono significativi delle tipiche installazioni della microcogenerazione.

I cinque casi studio hanno mostrato che con un dimensionamento attento si possono riscontrare prestazioni in linea con quelle di targa. Le principali indicazioni raccolte sono state:

- vibrazioni e rumore possono creare problemi seri in contesti urbani, anche se l'utenza è del terziario, comportando una riduzione forzata delle ore di funzionamento rispetto a quelle di progetto, con evidenti conseguenze negative sul business plan dell'investimento;
- l'acqua calda nelle utenze condominiali, laddove prodotta centralmente, è un'utenza molto interessante e che garantisce ore di funzionamento annue elevate;
- l'accoppiamento con pompe di calore, nell'esempio ad acqua di falda, si dimostra promettente, anche se richiede un maggiore sforzo progettuale e richiede una rete di distribuzione del calore a bassa temperatura per esprimere le migliori performance;
- la presenza di piscine nell'utenza servita è un atout per la microcogenerazione, in quanto consente di funzionare su un numero di ore annue elevato e permette anche di funzionare, almeno entro certi limiti, ad inseguimento del carico elettrico, grazie all'inerzia termica delle vasche;
- se l'utente finale è sottoposto all'accisa per usi industriali sul combustibile le ore di funzionamento annue devono essere molto elevate per garantire un ritorno dell'investimento accettabile.

Relativamente alla strumentazione si può sintetizzare quanto segue. La strumentazione installata sulle macchine cogenerative comprende un contatore dell'energia elettrica e un contatore dell'energia termica prodotte. Il contatore elettrico è necessario ai fini fiscali per il calcolo dell'accisa elettrica e il passaggio di fiscalità del combustibile, a meno che non si proceda con il pagamento forfettario dell'accisa elettrica. La lettura del contatore deve essere riportata giornalmente sul registro di officina per macchine da 50 kW_e in su. Il contatore di energia termica invece serve per la dichiarazione annuale al GSE per il riconoscimento della cogenerazione ad alto

rendimento, l'incentivo e in alcuni casi per la fatturazione dell'energia termica fornita all'utenza o la valutazione del contributo termico fornito dal cogeneratore.

Questi strumenti possono essere a se stanti o letti da un sistema di supervisione/controllo, con eventuale registrazione a diversi intervalli temporali. Alcune macchine hanno anche contatori interni che registrano le ore di funzionamento, avviamenti e in alcuni casi anche la produzione elettrica e termica.

Un freno al maggior utilizzo dei sistemi di supervisione/controllo è che, benché siano diventati molto più immediati grazie alle evolute interfacce grafiche, richiedono comunque una certa dimestichezza. Spesso non vengono gestiti direttamente dai tecnici che si occupano dell'impianto, o comunque per operazioni non ordinarie è necessario o si preferisce ricorrere all'intervento di personale specializzato, interno o esterno.

Le dotazioni hardware e software dei vari impianti di supervisione/controllo incontrati sono piuttosto flessibili ed espandibili e permetterebbero almeno a livello tecnico di acquisire le misure mancanti con modifiche non particolarmente importanti e in un futuro prossimo potrebbero anche essere aggiornati per rispondere in tempo reale ai segnali di prezzo.

La scarsa propensione ad aggiungere nuovi punti di misura, creare indicatori e registrare a intervalli regolari i parametri è in parte da imputare alle difficoltà di utilizzo che portano al disinteresse dei tecnici che seguono gli impianti tutti i giorni, dall'altra agli alti costi spesso richiesti per modificare il software, che suggeriscono di aspettare altre modifiche importanti e realizzarle tutte insieme.

C. Sviluppo di strategie ottimali di gestione delle reti termiche

Le attività del presente obiettivo si sono focalizzate sullo studio delle potenzialità di contenimento dei consumi energetici dei dispositivi di poligenerazione distribuita e delle reti energetiche locali.

Tali attività sono state condotte in stretta collaborazione con l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" Dipartimento DIAEE, che ha sviluppato il modello di rete termica (dettagli nel paragrafo 3.6) che è stato integrato nella piattaforma software sviluppata da ENEA.

In tale contesto si inserisce anche l'attività dell'Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, descritta in maniera dettagliata nel seguito.

Le reti energetiche locali

Con il D.lgs. 28/11: attuazione della direttiva 2009/28/CE, dal 28 Maggio 2012 gli impianti di produzione di energia termica per edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti devono essere progettati e realizzati in modo da garantire la copertura di almeno il 20% del fabbisogno termico di acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento da fonti rinnovabili; il decreto prevede inoltre un incremento al 50% dal 1 Gennaio 2017.

Gli obiettivi previsti dal decreto potrebbero risultare particolarmente ambiziosi, in particolare per complessi edilizi ad alta densità abitativa, dove l'adozione di tecnologie capaci di produrre la necessaria energia termica da fonte rinnovabile potrebbero trovare difficoltà applicativa, per mancanza di spazi o per difficoltà integrative, tali da spingere i progettisti a invocare il vincolo tecnico. In questo contesto si ritiene particolarmente importante analizzare le potenzialità delle reti energetiche locali come possibile soluzione ai vincoli tecnici che contrastano la diffusione delle fonti rinnovabili.

La rete energetica locale è vista come il mix dei due sottosistemi elettrici e termici a servizio di un agglomerato urbano ben definito (centro commerciale, centro direzionale, piccolo quartiere) alla quale possono essere connessi sistemi di poligenerazione distribuita di piccola taglia combinando fonti rinnovabili elettrici (FV, piccolo eolico) e termici (collettori solari) con tecnologie per la cogenerazione diffusa .

L'applicazione delle reti energetiche locali combinate con sistemi ICT consente un minore trasporto dell'energia elettrica e una minore dispersione nella rete distributiva, facilità l'erogazione, da parte di un unico gestore, dei servizi ancillari di rete limitandone gli effetti negativi dovuti allo sbilanciamento delle fonti non programmabili favorendone l'integrazione con i sistemi di distribuzione elettrica nazionali e europei.

Attualmente le reti energetiche locali presenti sul territorio nazionale sono principalmente del tipo termico caratterizzate da classici sistemi di teleriscaldamento urbano la cui estensione, secondo il Rapporto AIRU 2011, ha raggiunto i 2.772 km a cui risultano allacciate 48.568 sottocentrali d'utenza.

Dal censimento AIRU 2011 risulta comunque una diffusa presenza, soprattutto nel nord Italia, di reti energetiche di piccole dimensioni con diversi livelli di densità di carico ed estensione massima entro 6 km come riportato nella versione estesa del Report [RdS/2012/078].

In ambito internazionale, la partecipazione a gruppi di lavoro della IEA (Annex 54, Integration of Micro-Generation and Related Energy Technologies in Buildings) ha evidenziato la volontà delle altre nazioni ad investire nelle micro reti locali come strumento di sviluppo, sicurezza e salvaguardia ambientale.

In particolare la Tokyo Gas dal 2010 si sta occupando della realizzazione e gestione della prima Smart Energy Networks costituita da un sistema di poligenerazione distribuita (elettrica e termica) costituito da un sistema fotovoltaico installato su più installazioni di circa 90 kWp, un campo solare di circa 300 m^2 e due unità CHP da 370 e 700 kWe a servizio di un cluster di edifici eterogenei e con profili di utilizzo tali da poter appiattire il diagramma di carico giornaliero.

Partendo dai risultati ottenuti con lo sviluppo della piattaforma di simulazione ODESSE, [Report RdS/2011/178, RSE/2009/188, RdS/2010/251] si è implementato, in ambiente Matlab/Simulink, un modello capace di riprodurre la richiesta energetica oraria di un sistema multi edificio connesso tramite appositi modelli di rete elettrica e termica locale agli impianti di generazione in assetto generazione distribuita.

Il nuovo simulatore integra i modelli dei principali componenti che costituiscono una rete energetica locale:

- rete termica per la fornitura del servizio riscaldamento e ACS a un agglomerato di utenze (scala quartiere)
- rete elettrica urbana in MT e BT
- sistema multi edificio in grado di prevenire il carico termico ed elettrico orario di un quartiere.

Rete elettrica: modello in simulink e integrazione con il modello multiedificio

Per una descrizione dettagliata del modello di rete elettrica implementato nel nuovo software si rimanda al Report redatto dall'Università di Palermo e da ENEA [RdS/2012/080].

Il modello effettua ad ogni passo di simulazione (15 min) un'analisi dei flussi di potenza (load flow analysis) che transitano su ogni ramo della rete elettrica, una volta note le potenze generate e le richieste di carico, fornite dai relativi modelli presenti all'interno del software.

Il modello effettuando il load flow analysis fornisce le perdite per effetto Joule nelle linee in cavo o aeree e le tensioni in ogni nodo della rete locale.

Affinché il modello della rete elettrica possa interagire ottimamente con i sottosistemi che compongono la piattaforma di simulazione integrata, il calcolo del Load flow (algoritmo di Newton Raphson), inizialmente codificato in linguaggio MatLab è stata inglobato in un blocco Embedded function di Simulink

L'estensione del modello prevede la realizzazione di una interfaccia grafica (possibilmente anche con un layer per la rete termica) che faciliti l'utente nella costruzione topologica della rete e nella caratterizzazione di ciascuna linea e nodo.

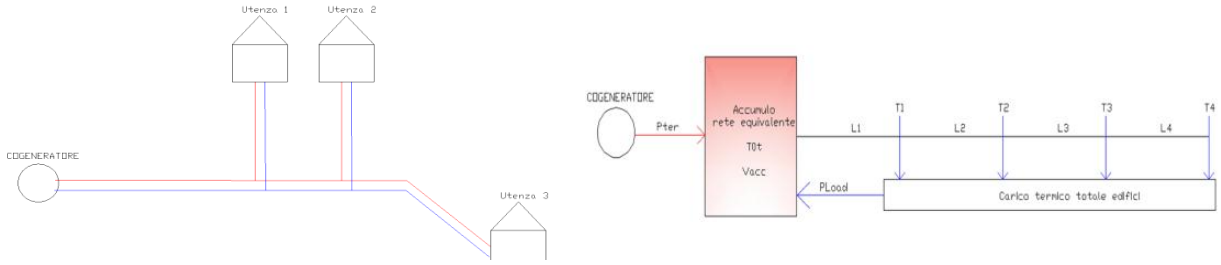
Rete Termica: modello in Simulink e integrazione con il modello multiedificio

Per una descrizione dettagliata del modello di rete termica integrata nel nuovo software si rimanda al Report prodotto dall'Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica [RdS/2012/079].
Il modello termico della rete fornisce in output la temperatura ad ogni nodo della rete, l'andamento nel dominio del tempo della temperatura media della rete e le perdite energetiche lungo la rete.

Poiché l'ipotesi di regime stazionario, anche se più semplice da implementare, non consentirebbe lo studio degli effetti benefici apportati dall'inerzia termica della rete nella gestione degli impianti di generazione, è stata implementata l'equazione della temperatura del fluido termovettore nel dominio del tempo. Lo studio è stato condotto con l'ipotesi semplificativa di modellizzare la rete come un unico accumulo termico con volume e massa coincidente con quella del fluido termovettore contenuto nella rete da simulare. La temperatura media dell'accumulo ideale si ipotizza coincidente con la temperatura di mandata To (t) della rete, il cui andamento nel tempo è data dalla soluzione dell'equazione differenziale già implementa nei modelli d'impianto del Software ODESSE come descritto nel Report RdS/2010/251.

Definito lo schema della rete, l'utente, tramite una struttura dati in Simulink definisce i parametri dello schema equivalente della rete (volume equivalente, lunghezze singole tratti, parametri tubi, Figura 236).

Lo scambio di informazioni run-time tra la rete (accumulo termico ideale) e gli edifici avviene tramite le relative sottostazione d'utenza modellizzate con uno scambiatore termico a contro flussi.



Schema fisico rete termica **Schema equivalente rete termica (accumulo fittizio)**

Figura 236. Schema della rete termica

Modello multi-edificio

La gestione ottimizzata di una rete energetica non può prescindere dalla previsione dei carichi elettrici e termici delle singole utenze servite. A tal fine è stato esteso il modello di edificio mono zona, (Report RSE/2009/188) implementato all'interno del software ODESSE, riproducendolo opportunamente modificato, in un numero definito di blocchi pari al numero massimo di utenze previste per una rete termica ed elettrica locale di quartiere.

Per lo studio in oggetto, il cluster di edifici è stato limitato a cinque unità con l'intento di estendere, nel proseguo dell'attività, il numero di utenze ad un numero comunque scalabile, ma in ogni caso limitato alla dimensione di quartiere nell'ottica di ottimizzare l'interazione tra consumo e generazione locale dell'energia secondo il concetto di micro rete attiva.

Nella Figura 237 si riporta la versione semplificata dello schema a blocchi Simulink in cui sono riportati i cinque edifici che costituiscono il cluster potenziale del modello multi edificio in oggetto.

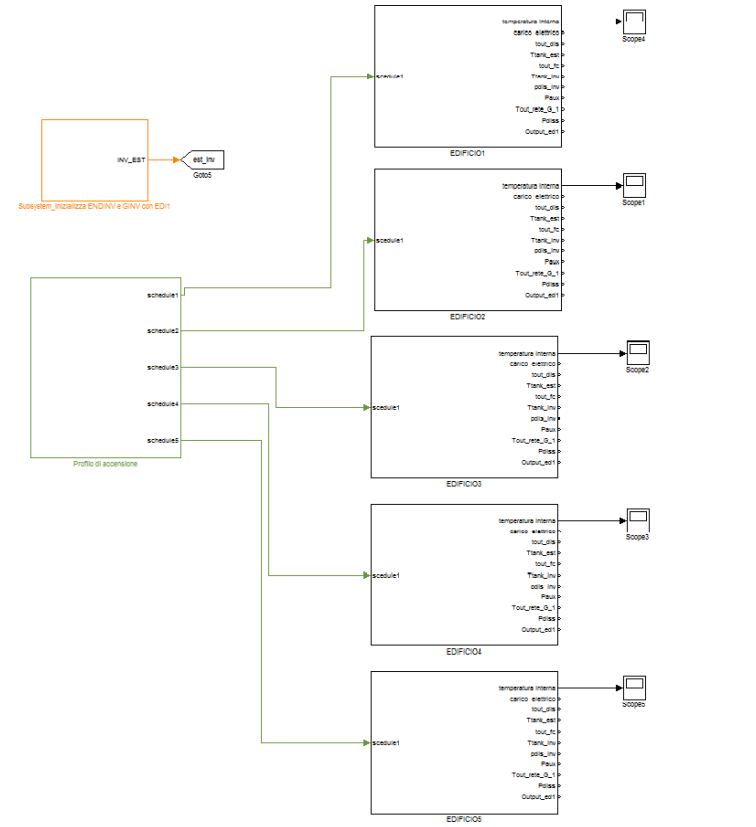


Figura 237. Schema Simulink del modello multi-edificio

Ogni blocco contiene i modelli necessari per simulare il comportamento termico ed elettrico orario di ciascun edificio; in particolare sono presenti i seguenti moduli:

- Processore solare
- Calcolo della temperatura interna
- Sottostazione d'utente con scambiatore di calore per la connessione alla rete termica esterna e accumulo termico stagionale
- Calcolo del carico elettrico orario
- Calcolo del carico termico per acqua calda sanitaria
- Generatori profili di occupazione, infiltrazione illuminazione dell'edificio
- Generatore termico interno ausiliario
- Sistema di distribuzione della potenza termica (fan coil, radiatori).

La presenza di più modelli uguali all'interno dello stesso ambiente Simulink ha posto un ostacolo implementativo dovuto alla presenza di modelli uguali con uguale nome dei parametri la cui modifica avrebbe reso

Per continuare a utilizzare la stessa struttura dati per l'inizializzazione dei parametri termofisici degli edifici già implementata nelle precedenti annualità per il software ODESSE, è stato utilizzato lo strumento "mask editor" di Simulink con il quale ogni blocco edificio viene inizializzato indipendentemente dagli altri senza la necessità di rinominare tutti i parametri della struttura dati del modello edificio.

Come si evince dalla Figura 238 ad ogni blocco vengono associati tre file contenenti rispettivamente le caratteristiche termofisiche dell'edificio, le caratteristiche dell'impianto termico (compresa la distribuzione) e i profili di utilizzo.

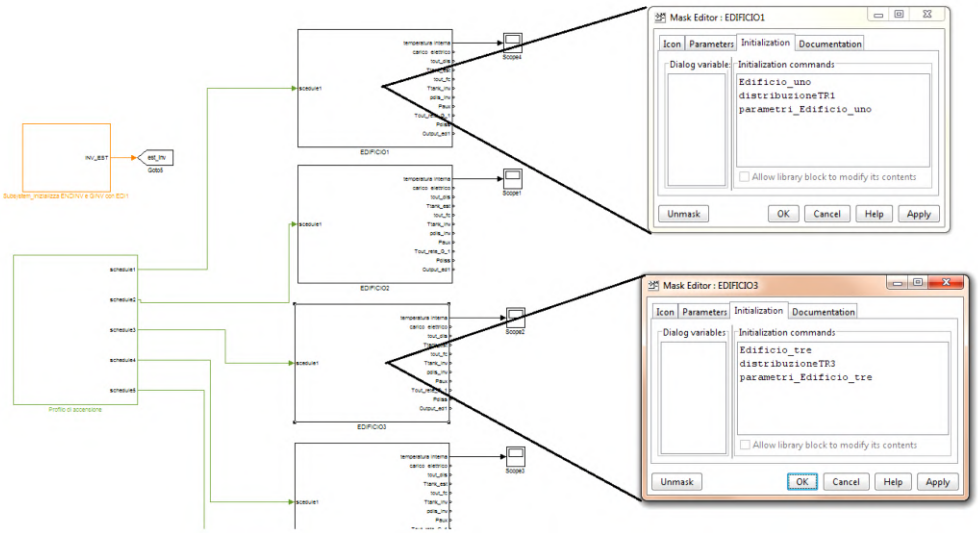


Figura 238. Inizializzazione dei blocchi edificio in Simulink

Come si evince dalla Figura 238 ad ogni blocco vengono associati tre file contenenti rispettivamente le caratteristiche termofisiche dell'edificio, le caratteri-stiche dell'impianto termico (compresa la distribuzione) e i profili di utilizzo.

Lo strumento "mask editor" di Simulink consente, inoltre, la possibilità di estendere l'attuale modello "multi edificio" ad un cluster di edifici avente scala più ampia e comunque personalizzabile.

Ogni utenza che costituisce il modello "multi edificio" è connessa alla rete di teleriscaldamento tramite una sottostazione (Figura 239) i cui componenti principali sono: scambiatore di calore, accumulo termico, valvole di sezionamento e sistema di controllo e misura.

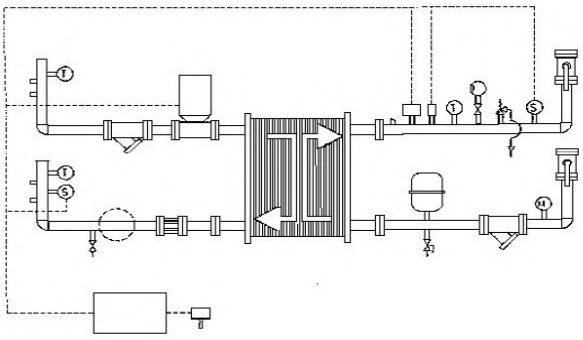


Figura 239. Schema impianto sottostazione d'utenza

Ogni sottostazione d'utenza è gestita con quattro livelli di controllo :

- schedule orario lo scambiatore viene staccato dalla rete nelle ore e nei giorni in cui l'edificio non deve essere riscaldato

- termostato accumulo caldo di edificio: apre e chiude la valvola del bypass con la rete quando l'accumulo termico della sottostazione arriva alla temperatura di set point
- sensore temperatura di rete: garantisce che il trasferimento di potenza avvenga sempre della rete all'accumulo caldo della sottostazione
- gestione stagione (estate inverno): dal modello Monozona di ODESSE è stato importato il contatore dei giorni con il quale viene individuato il periodo della stagione invernale e della stagione estiva in funzione della località climatica.

La portata d'acqua calda in ingresso dalla rete ad ogni sottostazione è funzione del carico termico nominale dell'edificio dato dal prodotto tra il numero degli elementi terminali installati, fan coil o radiatori, e la potenza termica nominale di ciascuno elemento.

l modello Simulink per il carico elettrico orario dell'edificio tipo residenziale è stato importato da ODESSE come descritto nel Report RSE/2009/188; per la stima del carico elettrico di edifici tipo uffici, nel corso dell'ultima annualità sono stati elaborate le misure condotte durante una campagna di acquisizione strumentale di alcuni edifici ENEA in corso dal 2009.

L'analisi delle misure aggiornate a luglio 2012 ha consentito l'elaborazione di un profilo di carico medio settimanale adimesionalizzato rispetto alla superficie utile dell'edificio

Software disponibili per la simulazione di sistemi energetici distribuiti

Il problema della progettazione e l'ottimizzazione di reti energetiche ha portato con se la difficoltà di avere uno strumento in grado di simulare tali tipologie di reti per permettere una sperimentazione. Negli anni, infatti, sono stati prodotti diversi software di questa tipologia, e, prima di scegliere di implementarne uno ex novo, essi sono stati studiati e valutati. Sono presenti, infatti, sul mercato diverse tipologie di simulatori, e i due approcci più utilizzati si basano sulle serie temporali o su dati statistici.

In particolare alla luce della ricerca effettuata tra i vari software di modellazione per reti termo-energetiche ormai di riferimento nel campo della progettazione e della ricerca come EnergyPlus, TRNSYS, HOMER, Message, Teleris, DIGSILENT, si è osservato che al momento non esistono strumenti che posseggano le qualità da noi richieste: interfaccia user friendly, configurazione della rete in maniera intuitiva, dinamicità del sistema simulato, risultati fruibili da utenti non necessariamente esperti, compatibilità con software commerciali, descrizione e simulazione di sistemi multi edificio e delle reti sia elettriche che termiche locali.

Pertanto si rende necessario impostare e sviluppare un simulatore che possa assolvere a tali compiti e che sia modellabile ed espandibile, in vista di lavori futuri.

Applicazione del nuovo software di simulazione ad un cluster di edifici reale

Si riporta di seguito un primo esempio applicativo del nuovo tool, dal quale si evincono le potenzialità della piattaforma integrata in sviluppo. Negli scenari di seguito riportati, variano i diagrammi orari di accensione del sistema termico centralizzato e l'attivazione delle singole caldaie di backup.

In particolare l'applicazione fa riferimento a tre edifici con tipologia di utenza eterogenea (ufficio, centro commerciale, residenziale) riscaldati tramite un'unica microrete termica locale ed allacciate alla rete di elettrica in BT del distributore locale. La rete termica è servita da un'unita cogenerativa funzionate in parallelo alla rete BT con orari di accensione dipendenti dallo scenario simulato.

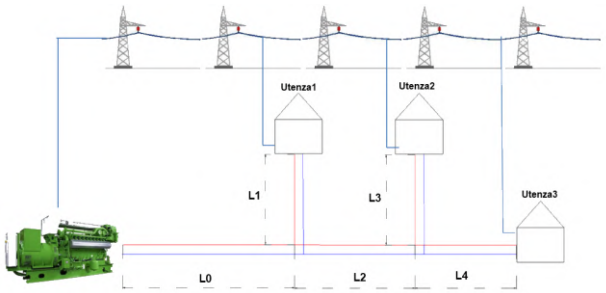


Figura 240. Schema semplificato del sistema multi-edificio integrato al sottosistema elettrico e termico oggetto dell'applicazione

Per valutare la migliore strategia di gestione della rete termica, in funzione dell'inerzia termica dell'accumulo e dei profili di occupazione degli edifici, sono stati definiti 5 scenari diversi per la gestione della rete termica. In Figura 241 si riporta lo schema a blocchi di interazione dei sottosistemi:

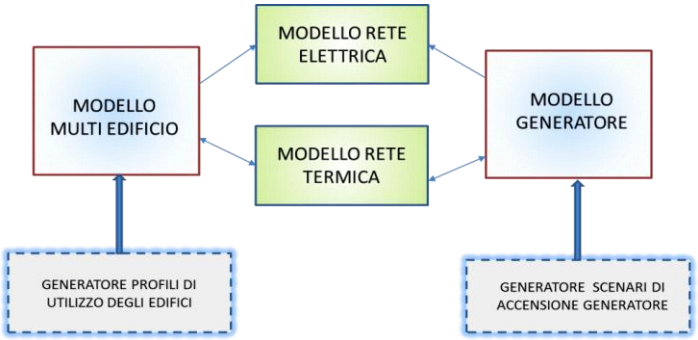


Figura 241. Schema interazione sottosistemi elettrico e termico della nuova piattaforma software

L'impianto centralizzato a servizio della rete è costituito da

- un cogeneratore con motore a combustione interna da 105 kWe
- una caldaia a gas ausiliaria da 400 kWt
- la rete termica ha le seguenti caratteristiche :
- temperatura del terreno: 15 °C
- diametro tubazione: 0,1 m
- trasmittanza termica tubazione : 0,4 Wm^{-2} K^{-1}
- L0=200; Lunghezza tratta rete L0 [m]
- L1=100; Lunghezza tratta rete L1 [m]
- L2=500; Lunghezza tratta rete L2 [m]
- L3=100; Lunghezza tratta rete L3 [m]

Di seguito si riporta una tabella di sintesi delle caratteristiche dei singoli edifici simulati e dei relativi impianti centralizzati di riscaldamento:

Tipologia edifici	Volume [m^3]	Carico termico nominale edifico [kW]	Ore equivalenti riscaldamento * [h]	Tipo distribuzione	n. elementi [n°]	Potenza singolo elemento [kW]	Potenza totale installata-P_fan [kW]	Portata fluido - G-ingresso sottostazione rete edificio** [kg/s]	Potenza caldaia ausiliaria [kW]
commerciale	17705	531,15	2016	fancoil	250	2,3	575	9,15	550
uffici	2530	75,9	912	fancoil	40	2,3	92	1,46	90
residenziale	1000	30	1680	fancoil	10	2,3	23	0,36	30

In Figura 242 è riportato lo schema unifilare di riferimento del sistema elettrico simulato.

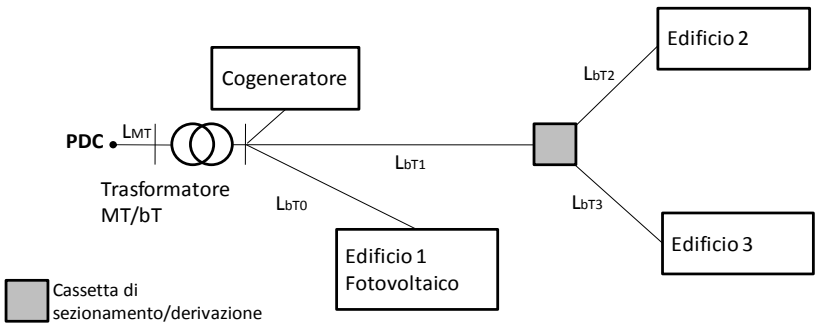


Figura 242. Modello circuitale semplificato del sistema multi-edificio considerato nelle applicazioni

Al fine di poter effettuare una analisi economica associata a ciascuno dei 5 scenari simulati sono stati definiti tra i seguenti costi di gestione:

- Gas non defiscalizzato singoli utente: 0,86 [€/Sm^3]
- Gas non defiscalizzato produttore : 0,70 [€/Sm^3]
- Gas defiscalizzato: 0,40 [€/Sm^3] (solo per cogenerazione)
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0,1034; [€/kWh]
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0,0872; [€/kWh]
- Energia elettrica ceduta dal cogeneratore in fascia F1 = 0,0762; [€/kWh].

Nelle tabelle 57 e 58 si riporta la descrizione sintetica dei 5 scenari ipotizzati, indicando in particolare per ogni scenario quali generatori sono presenti e l'intervallo giornaliero di funzionamento:

Tabella 57. Presenza generatori termici per ciascun scenario considerato

	Generatore Termico Centralizzato (cogeneratore + caldaia integrazione)	Generatore termico Ed1	Generatore termico Ed2	Generatore termico Ed3	Nota
Scenario 0	NON ATTIVO	ON	ON	ON	
Scenario 1	Attivo 24 ore su 24	OFF	OFF	OFF	
Scenario 2	Attivo 24 ore su 24	OFF	ON	ON	
Scenario 3	Attivo dalle 08 alle 20	OFF	OFF	OFF	
Scenario 4	Attivo dalle 08 alle 20	OFF	ON	ON	
Scenario 5	Attivo 24 ore su 24	OFF	OFF	OFF	Temperatura rete 15°C in meno rispetto scenario 1

Tabella 58. Potenza termica di ciascun generatore termico associata a ciascun scenario simulato

	Cogeneratore [kWt]	GTC caldaia integrazione[kW]	GED1[kW]	GED2[kW]	GED3[kW]
Scenario 0	0	0	550	90	30
Scenario 1	170	400	0	0	0
Scenario 2	170	400	0	90	30
Scenario 3	170	400	0	0	0
Scenario 4	170	400	0	90	30
Scenario 5	170	400	0	0	0

Sintesi dei risultati di simulazione dell'esempio applicativo

Le simulazioni dei diversi scenari relativi alla gestione della rete termica ed elettrica locale descritta nel paragrafo precedente, fanno comprendere le potenzialità della nuova piattaforma software integrata in termini di pianificazione di sistemi energetici complessi.

Nella Tabella 59 si riporta la sintesi dei risultati ottenuti dalla simulazione di ciascuno dei precedenti scenari.

Tabella 59. Sintesi risultati simulazione scenari ipotizzati per la gestione del caso applicativo

	Energia primaria totale [kWh]	Consumo gas totale [m^3]	Costo annuo energia [€]	Ricavi da vendita energia elettrica [€]	Differenza costi annui rispetto scenario zero [€]	Risparmio economico effettivo annuo [€]
scenario 0	694975,62	72393,29	62533,33	0,00		
scenario 1	1583566,35	164954,83	89092,60	67420,98	26559,27	40861,70
scenario 2	1579604,57	164542,14	108345,55	67201,27	45812,22	21389,05
scenario 3	1363204,86	142000,51	101934,01	40488,07	39400,69	1087,38
scenario 4	1364846,82	142171,54	102081,76	40483,84	39548,43	935,41
scenario 5	1505621,41	156835,56	102789,33	65239,02	40256,00	24983,01

Dall'analisi dei risultati riportati nella tabella precedente, si evince come il passaggio da sistema autonomo (scenario 0 singole caldaie per ciascuna utenza) alla rete termica locale apporta un beneficio in termini ambientali, in quanto sia ha una riduzione dell'energia primaria complessivamente consumata per il fabbisogno elettrico e termico.

L'unico scenario che comporta un incremento dei consumi di energia primaria e lo scenario 3, dovuto ad un utilizzo limitato del cogeneratore (accensione solo dalle 08:00 alle 20:00) e quindi ad una limitata produzione di energia elettrica per riuscire a compensare i flussi energetici sulla rete MT generati dai carichi dei singoli edifici.

I benefici economici per il gestore della rete sono dati dalla vendita dell'energia termica prodotta dal cogeneratore e dalla caldaia ausiliaria alle singole utenze (*servizio energia locale*) con le tariffe precedentemente indicate, e dai ricavi della cessione dell'energia elettrica alla rete attraverso il nodo di scambio, rappresentato dal trasformatore MT/BT.

Dall'analisi degli istogrammi (Figure 243-244) si nota come lo scenario che apporta il migliore beneficio ambientale (scenario 4) non coincide con lo scenario che apporta i maggiori ricavi al gestore della rete (scenario 5). Infatti lo scenario 5, pur essendo per definizione il più "green" in quanto prevede il funzionamento a bassa temperatura della rete, comporta un maggiore consumo di gas rispetto agli scenari 3 e 4 dovuto al funzionamento 24/24 h della centrale termica di rete. Allo stesso tempo il funzionamento a bassa temperatura riduce comunque le ore di funzionamento del cogeneratore rispetto allo scenario 1 e quindi si riduce la produzione di energia elettrica necessaria a ridurre i flussi dalla rete MT e quindi dal mix nazionale.

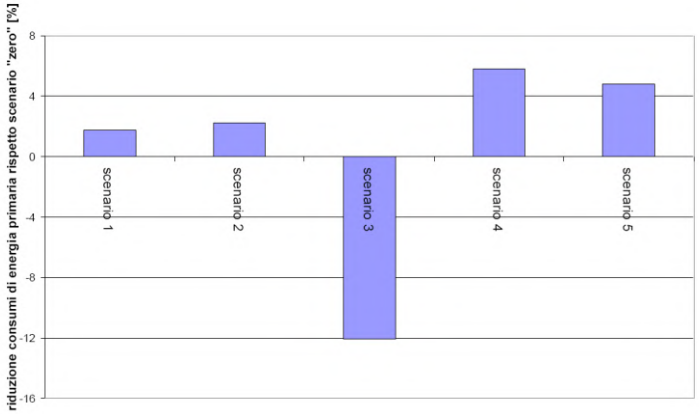


Figura 243. Risparmio annuo energia primaria ottenuto da ciascun scenario di gestione della rete rispetto allo scenario zero (nessuna rete)

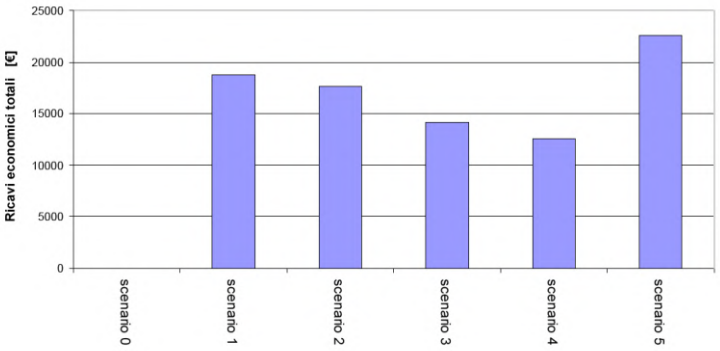


Figura 244. Risparmio economico annuo ottenuto da ciascun scenario di gestione della rete

Compensazione del carico elettrico degli edifici

Una delle chiavi di sviluppo e diffusione delle micro reti attive è la fornitura da parte di un unico soggetto dei servizi ancillari, cioè dei servizi espletati sulla rete sia lato generazione sia lato carico per garantire oltre alla qualità della fornitura anche funzionamento in sicurezza della rete.

L'esigenza di garantire la fornitura dei servizi ancillari base è tanto maggiore quanto più diffusa è la presenza all'interno della micro rete di generatori non programmabili come le fonti rinnovabili (fotovoltaico ed eolico); in quanto sono causa di problematiche come fluttuazioni di tensione e sbilanciamento della produzione rispetto al carico.

Oltre allo sviluppo di modelli specifici per simulare i servizi ancillari da integrare all'interno della nuova piattaforma software in oggetto, è stato avviato lo studio di fattibilità relativo alla progettazione e installazione di un compensatore statico di energia attiva e reattiva da installare in un nodo specifico della rete del C.R. ENEA di Casaccia. per l'erogazione dei servizi di rete sopra esposti con logiche di controllo e gestione personalizzabili in modo da ottimizzarne il funzionamento. In un'ottica di ottimizzazione delle risorse messe a disposizione dal presente Programma, la definizione delle specifiche tecniche dell'apparecchiatura è stata svolta integrando le attività previste nel "Progetto 1.2.2 -Sistemi avanzati di accumulo di energia" in collaborazione con l'Università di Pisa [Report RdS/2012/249].

Il sistema hardware denominato AFE (Active Front End) sarà costituito da:

- un inverter bidirezionale (con IGBT) da 30 kW;
- un pacco batterie a litio da 10 kVA;
- un sistema di barre in corrente continua a 600 V;
- una predisposizione per la connessione alle barre DC di un' utenza attiva (campo FV)e una utenza passiva (carico DC, veicolo elettrico).

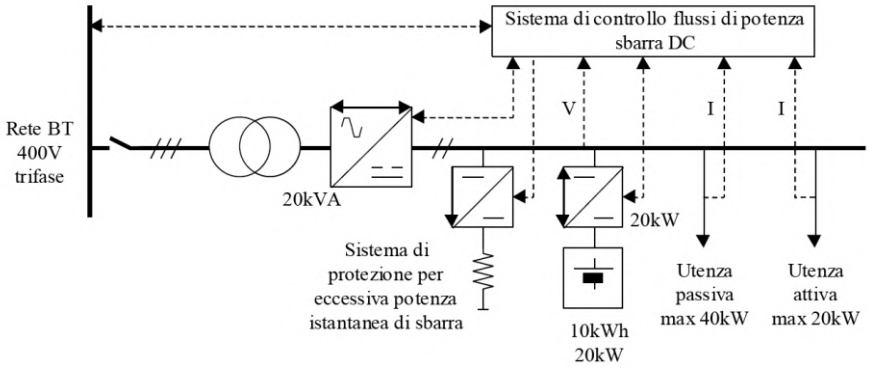


Figura 245. Schema del compensatore statico in progetto

L'obiettivo è quello di poter gestire una parte dell'anello MT del Centro Ricerche Casaccia come micro rete attiva applicando i servizi di rete ancillari sopra esposti seguendo anche le azioni di controllo prefigurate dalla norma nuova norma CEI 0-21.

In via preliminare è stato individuato l'edificio F84 dell'area Capanna come possibile carico elettrico su cui sperimentare il funzionamento del sistema inverter-accumulo.

L'edifico alimentato in bassa tensione dalla vicina cabina MT/BT (cabina 20), presenta un carico elettrico molto fluttuante causato dall'avviamento ciclico durante l'intero anno di un compressore da circa 30 kW per la climatizzazione di un laboratorio per la costruzione di celle fotovoltaiche

E' stata effettuata una campagna di misura per verificare il sovraccarico indotto sulla rete dal compressore, in Figura 246 si riporta l'andamento della potenza attiva e reattiva assorbita dal quadro frigo durante un'ora di un giorno tipo.

Come si evince dall'andamento della potenza attiva l'avviamento ciclico del compressore genera una un sovraccarico di circa 25 kW rispetto al base load costante di 10 kW.

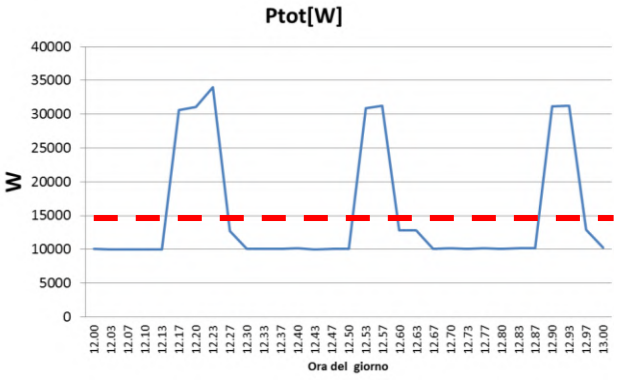


Figura 246. Sovraccarico ciclico dovuto all'avviamento del compressore – esempio di possibile livellamento della richiesta dopo compensazione (linea rossa tratteggiata)

Un ulteriore controllo del dispositivo agirà sulla potenza reattiva erogata per bilanciare la variazione delle tensione del nodo riportata nella Figura 247.

Nell'ottica della transazione verso la microrete attiva è stata predisposta una connessione con una utenza attiva in corrente continua come potrebbe essere un generatore fotovoltaico al fine di provare la gestione di una immissione di potenza in rete programmata da fonte non programmabile e allo stesso tempo ottimizzare i cicli di carica e scarica delle batterie a litio in funzione dei servizi di rete erogati (load levelling) e del prezzo dell'energia.

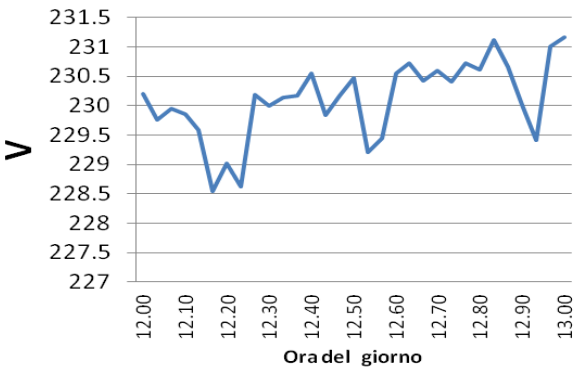


Figura 247. Tensione di fase nodo di connessione quadro frigo

Per rendere possibile la connessione di un campo FV sarà necessario l'inserimento di un convertitore DC/DC, anche esso da porsi in parallelo al BUS DC, che possa operare con un algoritmo di MPPT, la cui potenza sia di 30 kW di picco e tensione pari a quella nominale di barra DC (600 V).

In questo modo il compensatore eserciterà per la rete la funzione di Demand Response (DR), andando a ridurre, lato rete, il picco del carico ed a modificare la forma del diagramma di carico in relazione a segnali di prezzo.

Al fine di personalizzare le logiche di controllo dell'AFE con algoritmi che potranno essere applicati alla futura gestione di una smart grid è previsto che il sistema verrà pilotato tramite segnali esterni generati direttamente da modelli implementati in ambienti tipo Labview o Simulink.

In particolare per gestire il sistema dall'esterno, il controllo della potenza attiva e reattiva scambiata con la rete avviene tramite due triple di segnali analogici fornite tramite schede in/out:

- controllo della potenza attiva scambiata con la rete tramite tre segnali analogici esterni uno per fase (-10/+10V o -5/+5 come più comodo)con squilibrio massimo per fase del 30%
- controllo della potenza reattiva erogata per ciascuna fase tramite tre segnali analogici esterni in tensione(0/+10V o 0/+5 come più comodo)con squilibrio massimo per fase 30%

Senza interferire con i controlli di sicurezza interni al sistema, per gestire la potenza erogata ed assorbita dall'esterno è necessario che l'AFE e il BMS delle batterie al litio forniscano al sistema esterno (Labview o Simulink) le seguenti informazioni necessarie:

- misura della potenza attiva scambiata P;
- misura della potenza reattiva scambiata Q;
- misura della tensione ai morsetti lato AC del compensatore V;
- misura della frequenza ai morsetti del compensatore f;
- stima dello stato di carica del pacco batterie;
- segnali digitali di allarme.

Il sistema di monitoraggio del pacco accumulatori dovrà essere in grado di controllare le seguenti grandezze al fine di garantire un funzionamento in sicurezza del sistema:

- tensione di ogni modulo (a circuito aperto, in carica e scarica);
- temperatura ambiente;
- temperatura per alcuni moduli pilota da scegliere all'interno del pacco batterie;
- corrente del pacco durante la carica e scarica.

Per alimentare un eventuale carico in continua (es. ricarica veloce di un veicolo elettrico) di cui non si conosce il ciclo di funzionamento è previsto anche il passaggio in modalità automatica la quale prevede:

- gestione di carichi in continua attraverso l'erogazione della potenza, sia da parte delle batterie, sia da parte dell'AFE che preleva potenza dalla rete;
- ricarica delle batterie del compensatore nel qual caso queste ultime fossero scariche,
- non deve erogare potenza alla rete.

La fase di progettazione e realizzazione dell'oggetto si è conclusa, nel corso delle attività del prossimo anno si porterà a compimento l'installazione e le prove di sperimentazione e monitoraggio per la raccolta dati.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nei seguenti rapporti:

- RdS/2012/078 Sviluppo di uno strumento per l'analisi di reti energetiche complesse nel settore civile
- RdS/2012/079 Sviluppo e implementazione di moduli in ambiente Matlab-Simulink per la realizzazione di un simulatore di una rete energetica distribuita.

All'interno dell'obiettivo C il Centro Interdisciplinare Territorio Edilizia Restauro Ambiente (CITERA) dell'Università di Roma "La Sapienza ha svolto attività [Report RdS/2012/082] relativa alla caratterizzazione di un sistema ibrido rappresentativo di una micro–grid di prova per la valutazione delle funzionalità e potenzialità di software dedicati per la gestione energetica. In tale contesto, il CITERA ha applicato, per la prima volta in Italia, le potenzialità

dell'"Intelligent Operations Center" (IOC-IBM) alla gestione della smart grid dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Tra le potenzialità di IOC, che si configura come uno strumento informatico che produce messaggi di alert per un operatore decisionale, le applicazioni per l'energia risultano interessanti e propedeutiche allo sviluppo di un sistema di gestione articolato e soprattutto autonomo sulla base delle logiche che vengono impostate dagli operatori. In questa fase IOC produce una Reportistica attraverso Key Performance Indicator (KPI) che sono costruiti sulla logica padre-figlio per risalire lungo un albero genealogico fino ad arrivare al segnale di ingresso che si distingue per essere un messaggio di tipo CAP (Common Alert Protocol). Già in questa fase si delinea quindi la prima problematica nello sviluppo del sistema: la necessità di importare messaggi di tipo CAP a partire dalla sensoristica a bordo dei sistemi energetici. Definiti i segnali in ingresso, nella fattispecie i valori di potenza prelevati dalle macchine ed etichettati con un riferimento temporale, questi vengono raccolti e archiviati sul database interno per essere rielaborati e recuperati al fine di generare dei KPI ai quali assegnare dei valori di riferimento come elemento di valutazione di una data situazione; facciamo un esempio: il consumo di una struttura nel suo utilizzo normale avrà una banda di oscillazione contenuta attorno ad un valore medio con una certa distribuzione. Nel momento in cui ci si allontana dai valori di distribuzione di riferimento, IOC produrrà un segnale di alert modificando sul monitor dell'operatore predisposto il segnale da verde a giallo o rosso in base alla variazione apportata al valore di riferimento impostato. Se ad esempio è avvenuto un picco di consumo dovuto ad un assorbimento temporaneo che però può propagare eventi conseguenti si potrà associare al KPI un valore giallo, mentre se il disturbo introdotto causa eventi istantanei si potrà associare un valore rosso. Nell'istante di estinzione del disturbo, con il ripristino dei valori di riferimento, il KPI tornerà a presentare l'indice di riferimento, contraddistinto dal colore verde. Si può così introdurre la problematica di ordine superiore nello sviluppo di un dispositivo di gestione siffatto: la corretta definizione dei KPI, perché saranno questi a rappresentare la situazione monitorata.

In realtà così come è a tutt'oggi strutturato, l'IOC termina le sue utilità perché si limita a generare dei valori di riferimento che dovranno essere monitorati da apposito operatore e che sarà il soggetto che dovrà mettere in atto le azioni per il ripristino delle condizioni di normalità. Le potenzialità di IOC non si limitano però a questo livello perché consente di inserire e costruire su questa base sia dei processi di ottimizzazione, attraverso il tool C-PLEX, sia dei processi di verticalizzazione che consentiranno allo strumento software di agire in luogo dell'operatore. La verticalizzazione sarà la futura fase di sviluppo dell'IOC.

La definizione dei KPI viene così ad essere, insieme al sistema di acquisizione dati, la scelta fondamentale per l'implementazione di un sistema completamente automatico di gestione per la realizzazione della smart grid.

- *Descrizione del test case*

La smart grid energetica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" è il luogo di elezione per la sperimentazione dell'IOC ai fini energetici.

Essa è caratterizzata da un sistema di generazione complesso, installato presso il Centro Sportivo Universitario (CUS) della Sapienza, che integra al suo interno cicli termici ed impianti di conversione da fonti rinnovabili e che, di fatto, si configura come un laboratorio scientifico "*open air* " volto alla sperimentazione sul campo delle nuove tecnologie disponibili, delle strategie di controllo dei flussi energetici e della gestione di una rete di distribuzione ed utilizzo dell'energia elettrica e termica. L'impianto del CUS Roma di Tor di Quinto rappresenta un nodo attivo che si colloca all'interno di un progetto più ampio e già avviato, denominato "*smart grid* La Sapienza". Date l'eterogeneità e le peculiarità delle tecnologie in esso presenti si è dimostrata a tutti gli effetti una *Micro-Grid* nella *Smart Grid* ed è per questo che nell'attuale fase del progetto di ricerca si è scelto di testare il comportamento dell' ICT e della piattaforma software deputata al controllo, in un ambiente demo di piccola scala, per poi estendere il tutto alle altre isole implementando, ovviamente, logiche di gestione dedicate.

In questo quadro generale, il laboratorio del CUS Roma, sebbene distante fisicamente dal complesso edilizio relativo alla città Universitaria, è rappresentativo del primo sistema ibrido realizzato in Italia che impiega, in modo sinergico e razionale, le tecnologie della cogenerazione, del solare termico, del fotovoltaico, della produzione di idrogeno a bassa pressione mediante processo elettrolitico, dello stoccaggio di idrogeno mediante serbatoi ad idruri metallici, e delle celle a combustibile di piccola potenza ad uso di *range extender* per veicoli elettrici/ibridi.

Il Centro Sportivo di Tor di Quinto (Figura 248) è costituito da due palazzine, realizzate su piani pilotis, adibite ad uso uffici amministrativi, a palestre ed a spogliatoi. La realizzazione di questi due edifici non è stata contemporanea pertanto ogni unità immobiliare ha un suo impianto di riscaldamento che provvede autonomamente al soddisfacimento del fabbisogno termico per la climatizzazione e che, per la produzione di acqua calda sanitaria, è assistito da stringhe di collettori solari piani. Sono presenti poi quattro campi da tennis, due di calcio, due da calcetto, uno di rugby ed una pista di atletica. Infine, è presente una piscina coperta

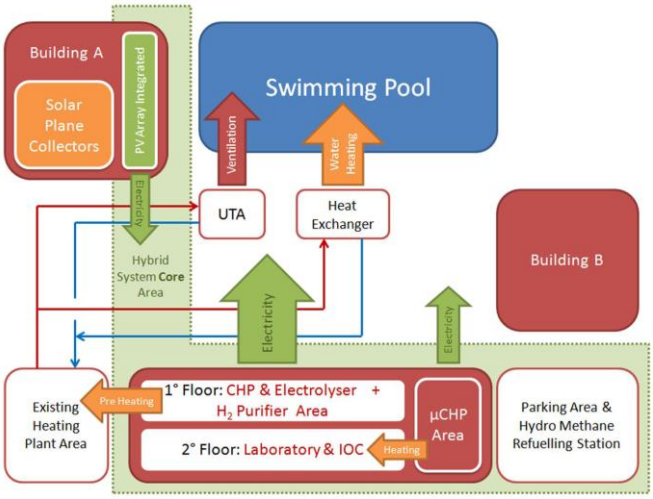


Figura 248. Schema delle connessioni degli impianti tecnologici installati presso il centro sportivo

realizzata all'interno di una struttura pressostatica che necessita, per il suo sostentamento, di ventilazione continua. Il ventilatore della termoventilante e altri ausiliari collegati su quella sezione del quadro elettrico, impegnano tra il 9 – 12 della potenza elettrica complessiva in relazione alle condizioni di carico. Il riscaldamento dell'acqua della vasca e dell'aria interna è garantito da due caldaie da 350 kW_{th} che funzionano normalmente una come *back up* dell'altra e ad integrazione sui picchi.

Vicino alla palazzina A è ubicato il nucleo tecnologico principale costituito da un motore a combustione interna opportunamente modificato per essere alimentato da idrometano, caratterizzato dalla presenza di elettrolizzatore che produce l'idrogeno necessario.

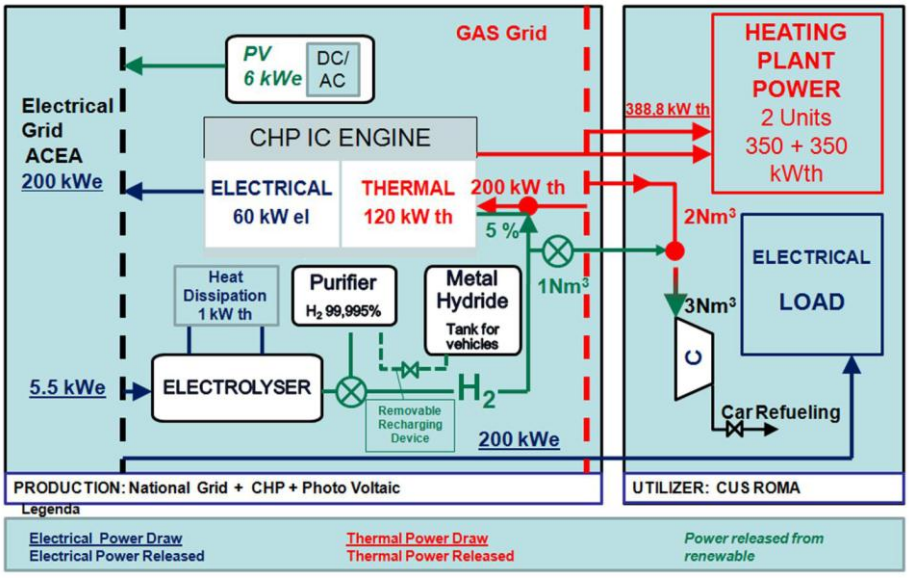


Figura 249. Schema funzionale del nucleo principale del sistema ibrido

L'idrogeno prodotto da energia rinnovabile (campo fotovoltaico installato sulla palazzina A) può seguire percorsi differenti in relazione alle esigenze dettate dalla conduzione di prove sperimentali orientate alla valutazione delle prestazioni di un macchinario piuttosto che un altro; in una fase successiva, invece, la scelta del percorso è gestita dall'intelligenza artificiale che ha il compito di intervenire automaticamente su tutti gli attuatori al fine di ottenere le migliori prestazioni ambientali ed energetiche in relazione alle mutevoli condizioni al contorno. Osservando la Figura 249 il primo possibile uso finale dell'idrogeno consiste nella produzione in *real time* delle miscele di idrometano 0-10% vol. per l'alimentazione del cogeneratore da 60 $kW_{el.}$ Alternativamente la miscela di idrometano può essere dirottata verso la stazione di rifornimento per autoveicoli consentendo il riempimento dei serbatoi con un tenore di idrogeno in miscela fino al 30% vol. Inoltre, dallo stesso tronco di linea di alimentazione del combustibile che collega il cogeneratore con la stazione di rifornimento è stato recentemente realizzato uno

stacco per alimentare anche il micro cogeneratore da 5 $kW_{el.}$ con miscele che possono arrivare fino al 50% vol. di H_2. Queste differenze di tenore di idrogeno in miscela sono causate dal fatto che le portate volumetriche di alimentazione delle varie macchine sono differenti tra loro, pertanto a parità di idrogeno rinnovabile disponibile, il risultato finale della miscelazione è diverso. Infine l'ultimo percorso possibile è quello che vede dirottata l'intera produzione di idrogeno verso il sistema di purificazione e ricarica di serbatoi ad idruri metallici.

La caratteristica vincente di questo sistema ibrido risiede nel fatto che la miscela viene prodotta quando serve (*just in time*) sicché, non avendo stoccaggio permanente, sono stati evitati problemi sia tecnici che normativi.

- *Definizione del modello tramite gli indicatori di performance (KPI)*

Il sottosistema di KPI inserito all'interno di IBM Intelligent Operations Center permette di avere a disposizione un visualizzazione grafica dello stato del sistema sotto osservazione e delle sue componenti. I valori dei KPI vengono aggiornati costantemente man mano che pervengono le misure dei sensori sul campo. IOC definisce una struttura ad "albero" dei KPI.

Nella Figura 250 si rappresenta il sistema funzionale del monitoraggio del bilancio elettrico del CUS Roma.

- Punti di misura.
  - Consumo elettrico: Palazzina A, Palazzina B, Piscina, Portineria
  - Produzione elettrica: Cogeneratore, Fotovoltaico

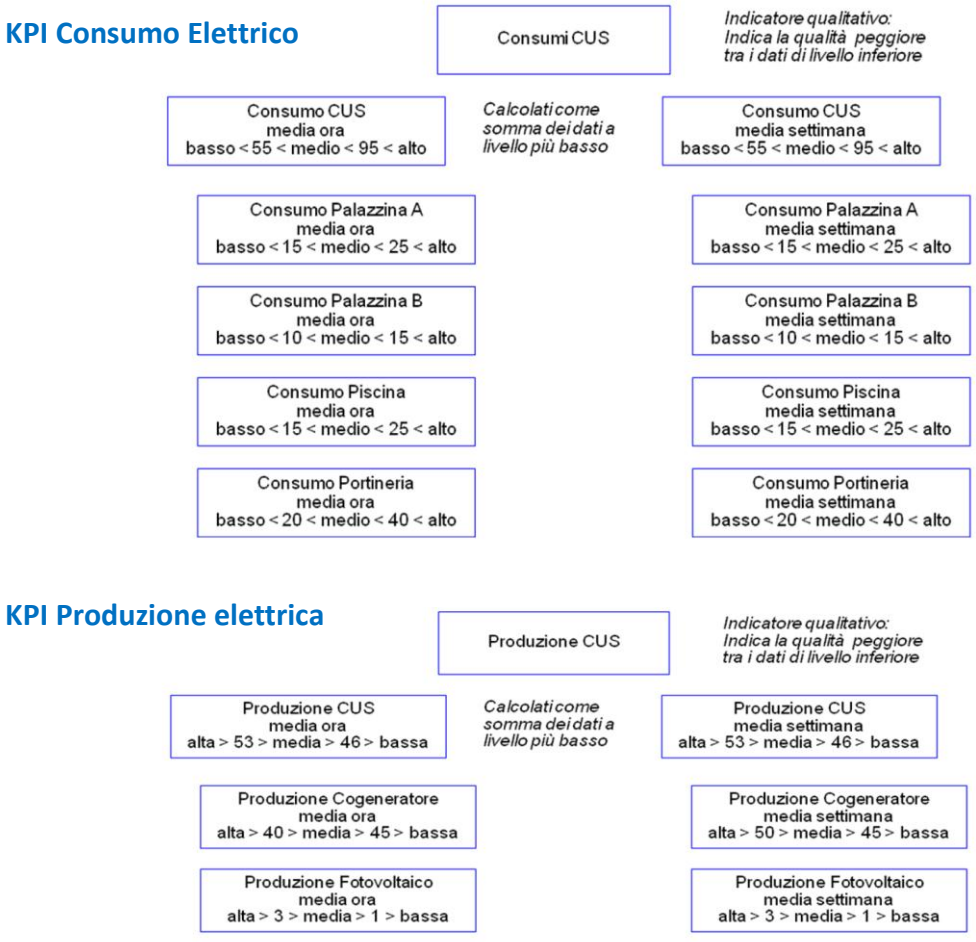
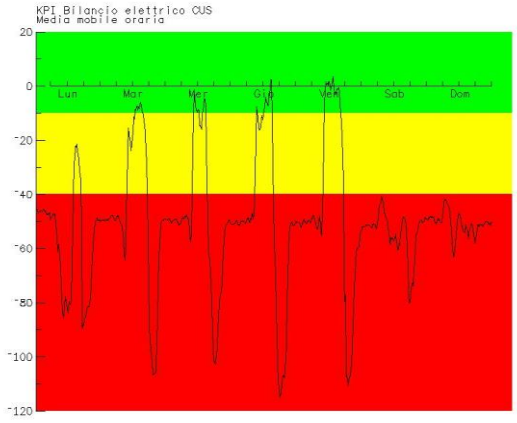


Figura 250. Schema funzionale del monitoraggio dati di consumo elettrico e produzione elettrica

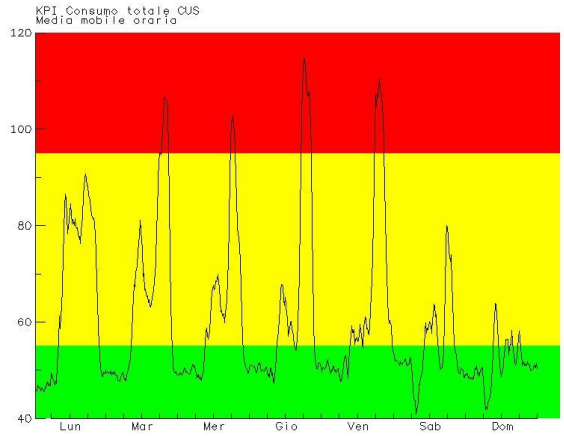
IOC riceve i dati di produzione e consumo dai sensori e li elabora per aggiornare i KPI così come indicati sopra, e li restituisce all'operatore attraverso una serie di pagine web-like.

Nella Figura 251a titolo di esempio si riporta la rappresentazione sinottica dei KPI principali: bilancio, consumo e produzione, con un colore attribuito sulla base delle indicazioni impostate relativi ad una settimana campione.

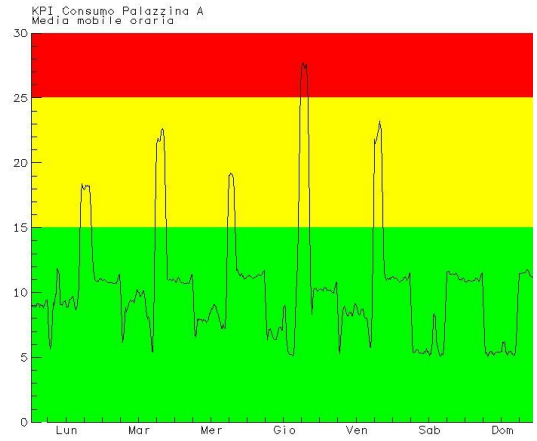
I risultati finali attesi sono senza dubbio di altissimo profilo proprio nell'ottica delle 4E (efficienza, efficacia, economia e environment) e consentiranno di avere probabilmente la smart grid energetica più avanzata in Europa



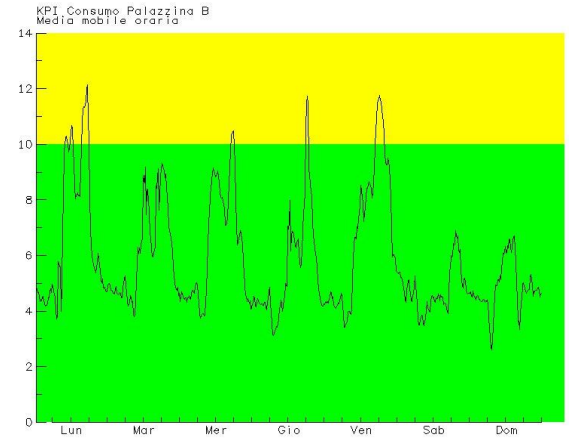
Bilancio elettrico totale centro CUS



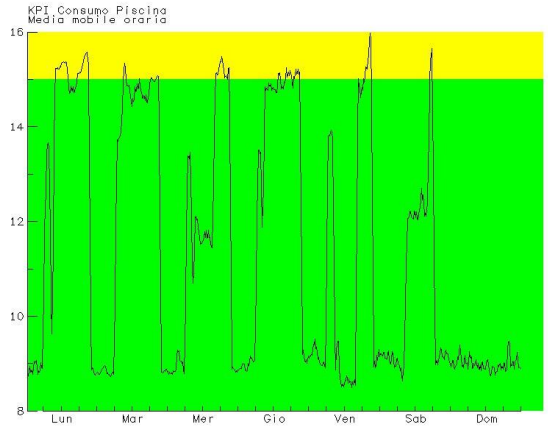
Consumo totale centro CUS



Consumo Palazzina A



Consumo Palazzina B



Consumo piscina

Figura 251. Rappresentazione sinottica dei KPI principali: bilancio, consumo e produzione (kW/ora)

L'attività svolta dal Dipartimento DIAEE dell'Università la Sapienza svolta all'interno dell'obiettivo C, è stata finalizzata allo sviluppo di modelli, che simulano il comportamento energetico di una rete termica per usi civili, allo scopo di integrarli in una piattaforma complessa in grado di simulare il comportamento termico di una rete energetica distribuita [Report RdS/2012/079], come descritto in precedenza.

Dopo una prima fase d'analisi delle problematiche relative alle diverse configurazioni di rete (ad anello chiuso, radiali, ibride) inerenti il comportamento termico in regime stazionario, includendo i componenti impiantistici che realizzano l'interfaccia di collegamento fra la rete e i nodi, si è proceduto con:

1. la definizione dei modelli energetici della rete termica necessari a collegare i nodi di carico (edifici) e quelli di generazione, basati sul comportamento reale dei sistemi impiantistici in configurazione "generazione distribuita";
2. l'implementazione dei suddetti modelli in ambiente MatLab/Simulink in modo da essere integrabili con i modelli di edificio e di impianti di generazione già realizzati nella piattaforma ODESSE.

E' stata scelta una configurazione di rete, in regime semi-stazionario, del tipo ad anello chiuso con il circuito di distribuzione principale separato dal circuito secondario di utenza (sistema indiretto) tramite una sottostazione di scambio termico la quale prende il posto della preesistente caldaia e dove viene anche installata la strumentazione di controllo e di misura.

La configurazione di rete considerata è schematizzata in Figura 252 ed è composta da un sistema a generazione distribuita del calore, di potenza limitata a valori dell'ordine delle centinaia di kW, ed da sistema di distribuzione di tipo radiale avente estensione massima di 2 km. Tale ipotesi è stata frutto di una indagine sugli impianti realmente esistenti in Italia.

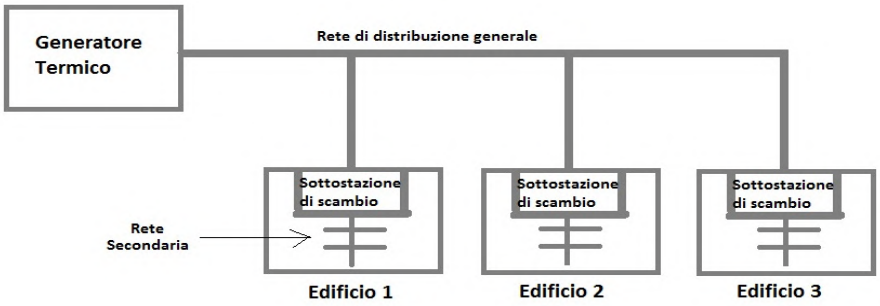


Figura 252. Schema di configurazione della rete

L'ipotesi di partenza nel modello da implementare prevede che la rete di distribuzione generale ha come punti di utilizzazione del calore le sottostazioni dei singoli edifici, a prescindere dal sistema di distribuzione secondario utilizzato all'interno dell'edificio. In questo caso l'impatto economico sarebbe contenuto per le dimensioni limitate dell'impianto di generazione e di distribuzione.

- *Sviluppo dei modelli e analisi delle simulazioni*

I modelli che sono stati sviluppati nell'ambito del progetto sono stati due: un modello a scambiatori di calore ed un modello a ripartizione di potenza. Il primo considera l'implementazione degli scambiatori di calore in modo da conoscere la temperatura del fluido termovettore presente nella rete sia in ingresso agli edifici, sia in uscita successivamente allo scambio di calore, ottenendo un'approssimazione quanto più simile alla realtà. Il secondo considera la differenza di temperatura tra quella che il fluido termovettore ha all'ingresso dell'edificio, e la temperatura media dell'accumulo interno all'edificio. In Tabella 60 sono mostrati i vantaggi e gli svantaggi di utilizzare un modello piuttosto che un altro.

Tabella 60. Confronto tra modelli sviluppati

Configurazione	Vantaggi	Svantaggi
Modello con scambiatori di calore	Dettagliato nella gestione delle temperature in ogni punto della rete	Complesso e difficilmente scalabile
Ripartizione di potenza	Facilmente implementabile all'aumentare dei nodi	Non si esegue un'analisi puntuale delle temperature del fluido termovettore in uscita dagli edifici

In entrambi i modelli sviluppati, la rete è stata implementata come un accumulo termico che abbia al suo interno una quantità di fluido termovettore pari al volume totale di fluido contenuto nei tubi. In questo modo è stato

possibile tenere conto dell'inerzia termica e della perdita energetica che la stessa rete introduce sull'intero sistema, quando un edificio faccia richiesta di potenza.

E' stato inoltre considerato che tale accumulo si trovi interrato ad una profondità superiore ad un metro, in modo da avere una temperatura ambiente, e quindi del terreno circostante, costante al variare della temperatura climatica.

Utilizzando ben note formulazioni matematiche applicate ai sistemi idraulici, si è tenuto conto anche della perdita, in termini di temperatura, che il fluido termovettore ha dal punto di immissione, dove è presente il generatore termico, al punto di fornitura costituito dall'edificio.

Le specifiche tecniche dei tubi che sono stati considerati, in termini di sezione interna, sezione dell'anello e spessore dell'isolante per il calcolo della trasmittanza, sono state prese da documentazione tecnica su componenti attualmente presenti nel mercato. In Figura 253 è mostrato il blocco in Simulink sviluppato per la rete.

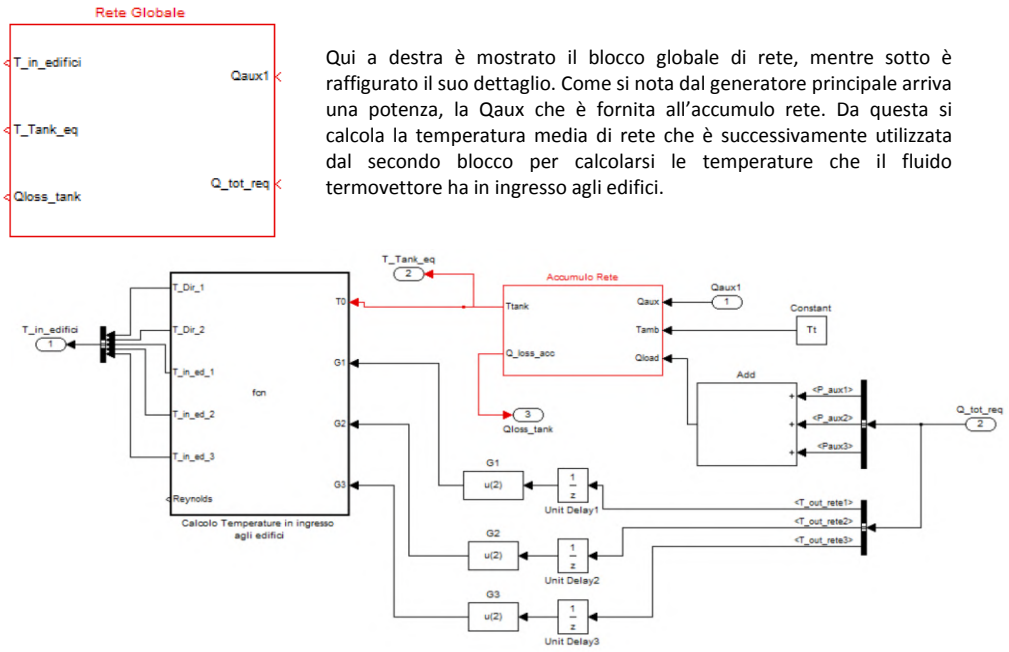


Figura 253. Schema Simulink del modello di rete

Per verificare che influenza abbia avuto l'introduzione della rete termica in termini energetici, nelle prime simulazioni è stato effettuato, per entrambi i modelli, lo studio considerando un sistema formato da un solo edificio, la rete termica e un generatore termico. Lo schema Simulink di tale sistema è mostrato in Figura 254.

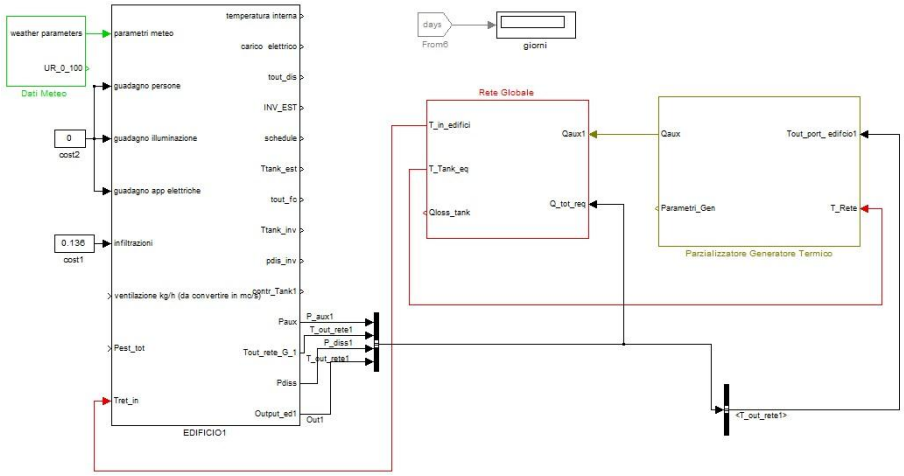


Figura 254. Schema generatore termico-rete e singolo edificio

La simulazione di tale sistema con il modello a scambiatori, ed una lunghezza di rete pari a 400m, ha prodotto gli andamenti della temperatura interna dell'edificio, della temperatura media di rete e della potenza dissipata in rete in Figura 255. Il carico termico per l'edificio è stato fornito da ENEA, secondo un profilo di riferimento per tutti gli sviluppatori dei modelli del "macro-obiettivo C" e si è deciso di focalizzare l'attenzione sul comportamento della rete, considerando il generatore termico principale di 50 kW di potenza nominale, sempre disponibile a fornire potenza termica nel periodo invernale.

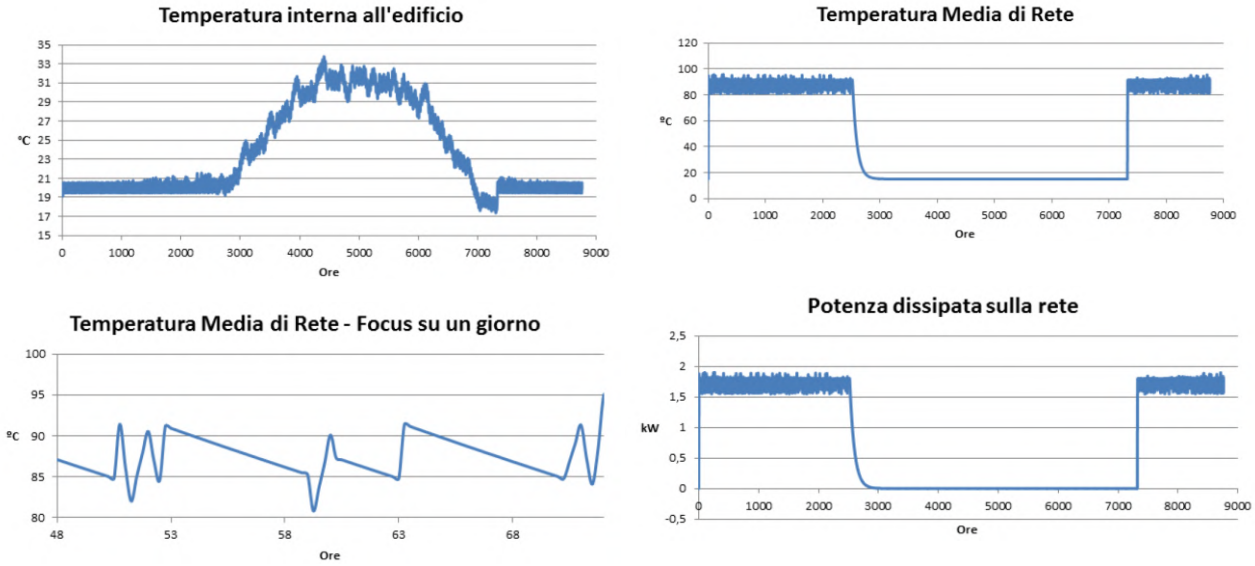


Figura 255.Temperature di edificio e di rete, potenza dissipata sulla rete

In Figura 256 sono raffigurati i bilanci energetici del sistema considerando l'energia fornita dal generatore principale, l'energia fornita all'edificio e l'energia dispersa sulla rete scegliendo due sezioni di tubo di rete

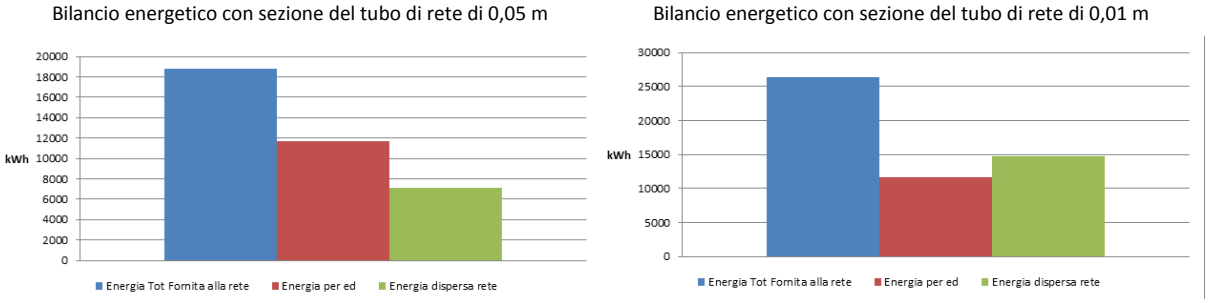


Figura 256. Confronto dei bilanci energetici con reti termiche a differente sezione

differenti. Come si evince dal confronto delle prime colonne, aumentando la sezione del tubo della rete, con conseguente aumento dell'inerzia termica si ottiene un'energia termica fornita dal generatore principale maggiore rispetto al caso in cui la sezione del tubo fosse scelta con dimensioni minori. La sezione, comunque, non può esser scelta al di sotto di un determinato valore per non eccedere nelle perdite di carico, che porterebbero ad una potenza idraulica, e conseguentemente elettrica, troppo elevata.

Successivamente si è studiata l'interazione della rete su un sistema multi-edificio. Per questo è stato dapprima studiata la possibilità di utilizzare una lunghezza media equivalente della rete reale da simulare, alla quale poter considerare i vari edifici, in modo da semplificare l'intera gestione della rete. Si è verificato come la differenza dei vari carichi termici e delle differenti politiche di scheduling per la fornitura di energia termica degli edifici influiscano negativamente portando ad un errore in percentuale troppo rilevante, e quindi si è scelto di utilizzare singolarmente le differenti distanze reali. La rete che è stata ipotizzata è costituita da tre edifici ed un generatore termico principale. Le distanze dei vari edifici dal generatore termico principale valutate per la simulazione, sono in Figura 257.

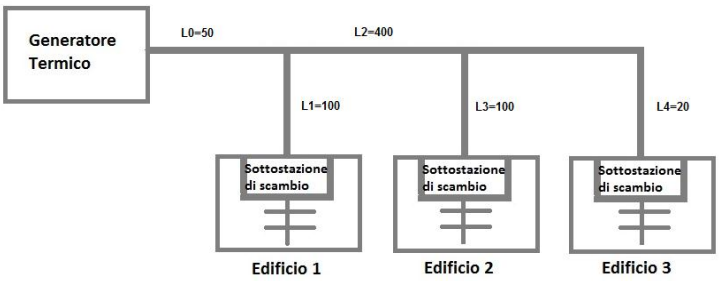


Figura 257. Layout di rete della simulazione effettuata

Per questa seconda analisi valutando nuovamente il modello a scambiatori di calore, si ottengono gli andamenti delle temperature mostrate in Figura 258. Anche in questa simulazione si nota come gli edifici rimangano sempre in temperatura tra i 19,5 ed i 20,5 ºC nel periodo invernale.

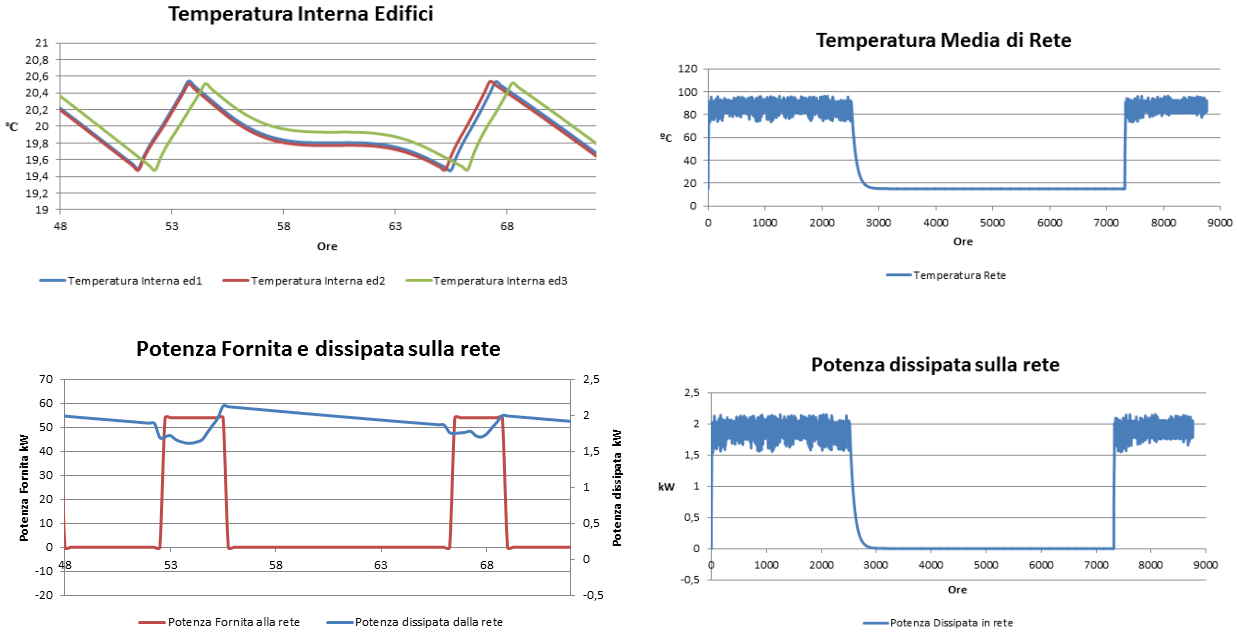


Figura 258. Temperature di edificio, di rete e di potenza dissipata sulla rete

A differenza del caso precedente è stato riportato l'andamento della potenza fornita e dissipata sulla rete per un singolo giorno, in modo da evidenziare come all'immissione di potenza da parte del generatore termico principale, ci sia un aumento, non molto rilevante, della potenza dispersa sulla rete. Il bilancio energetico del sistema totale è stato poi ricavato e confrontato con un'altra simulazione effettuata con il modello a ripartizione di potenza, in modo da evidenziare quali fossero le differenze in termini energetici. Tale confronto è mostrato in Figura 259.

- *Risultati*

L'analisi delle simulazioni effettuate porta a concludere che, in prima istanza, sarebbe meglio valutare il modello globale tenendo conto delle differenti lunghezze fisiche, per non incorrere in errori più o meno ingenti, che si accentuano in base sia ai differenti carichi termici che hanno gli edifici, sia ad una diversa logica di gestione dell'edificio. Questo suggerisce, come sviluppo futuro, la definizione di un parametro che meglio caratterizzi tale spostamento del baricentro dinamicamente.

Il modello della rete è stato implementato come un accumulo termico di volume pari al volume del fluido termovettore contenuto al suo interno. In questo modo è stato possibile tener conto dell'inerzia termica della rete. Lo sviluppo ha previsto due modelli differenti: a scambiatori di calore e a ripartizione di potenza. Il primo è stato realizzato considerando fisicamente ogni singolo scambio termico presente nei vari edifici; in questo modo si è voluto verificare il funzionamento quanto più possibile vicino alla realtà, in modo tale da commettere il minimo

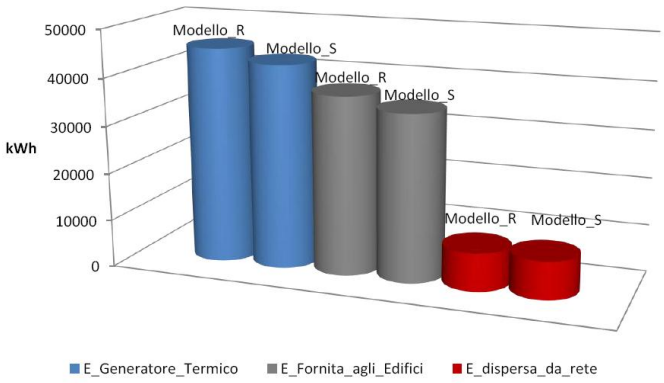


Figura 259. Confronto dell'energia fornita generatore termico principale, ceduta agli edifici e dispersa in rete nei due casi sviluppati (modello a Ripartizione di potenza, modello a Scambiatori)

errore possibile. Il secondo modello, quello a ripartizione di potenza, è stato implementato al fine di rendere il modello globale più scalabile, considerando l'obiettivo preposto della rete: quello di simulare il comportamento di un intero quartiere urbano per poter valutare il comportamento e l'interazione tra i vari edifici.

A tal fine è stato verificato il comportamento della rete in relazione alla potenza dissipata su essa e dell'energia totale dispersa considerando un anno di funzionamento con un singolo edificio e con tre edifici posti a differenti distanze dal GTP. Sono state studiate anche quali implicazioni, in termini energetici, avrebbe avuto in termini energetici un aumento della sezione del tubo e, quindi, dell'inerzia termica della rete. Come si è potuto constatare, aumentando troppo tale valore, si avrebbe una dispersione di calore troppo accentuata e non conveniente dal punto di vista dell'efficienza del sistema. In Figura 259 è mostrata la differenza dei bilanci energetici ottenuti attraverso le simulazioni effettuate per entrambi i modelli nel layout a tre edifici. Le prime due colonne rappresentano l'energia termica totale fornita dal generator termico primario (GTP): quella più a sinistra è il valore per il modello a ripartizione di potenza, mentre quella più a destra è il valore di energia termica fornita dal GTP nel modello a scambiatori. Come si nota dalla Figura 259, la maggiore differenza si ha nell'energia ceduta agli edifici. Tale differenza è stata calcolata e vale, per le simulazioni effettuate, circa il 5%. Anche se può sembrare non trascurabile, occorre considerare il fatto che la rete è stata valutata nel peggiore dei casi, e quindi quello di massimo funzionamento durante il periodo invernale. Inoltre è possibile calcolare un fattore correttivo che possa far utilizzare indistintamente i due modelli. Questo perché sebbene converrebbe adoperare sempre il modello a scambiatori, quest'ultimo risulta difficilmente scalabile. Invece, le potenzialità del modello a ripartizione di potenza sono notevoli, e raggiungono in maniera ingegneristica gli scopi proposti, e quindi quello di inserire la rete in un contesto più complesso in modo da poter simulare il comportamento termico-energetico dell'implementazione della rete in un distretto cittadino più ampio, e capirne i vantaggi economico-ambientali.

D. Sviluppo di modelli per il contenimento dei consumi energetici nel sistema edifici-impianti connesso ad una rete complessa

Il modello di edificio multi-zona

Lo sviluppo del modello di edificio multizona nasce dalla necessità di valutare i consumi energetici di edifici che presentano delle zone in cui i carichi termici sono notevolmente differenti fra loro o per destinazione d'uso o per orientamento. Lo sviluppo del modello multizona è avvenuto sulla base delle caratteristiche della piattaforma ODESSE, ovvero coniugare la facilità di utilizzo con una semplificazione dei modelli matematici, mantenendo una buona approssimazione dei risultati.

Per tali motivi in questa annualità è stato sviluppato il modello multizona del solo edificio senza impianti ed è stata effettuata una serie di valutazioni comparate con uno dei software maggiormente usati in campo di simulazioni dinamiche di edifici: Trnsys.

Il modello edificio multizona costituisce uno sviluppo del modello edificio monozona esaminato nelle annualità precedenti.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il modello è quella di dividere l'edificio in un certo numero di zone (impostabili dall'utente) che non interagiscono termicamente fra loro e per le quali è possibile definire i profili di carico (occupanti, luci, apparecchiature elettriche, ventilazione-infiltrazione) e prevede, negli sviluppi futuri, la possibilità di impostare i profili di funzionamento degli impianti.

Certamente tale ipotesi introduce una semplificazione dei fenomeni di scambio termico nell'edificio, ma, nell'ottica di analizzare macroscopicamente il comportamento di un edificio inserito in una rete termica, appare accettabile, come sarà evidenziato nei paragrafi seguenti.

Il modello prevede un massimo di 6 zone ed è costituito da 6 modelli identici, ciascuno inizializzato con un m-file (tipo di file usato in Matlab per passare al modello i parametri necessari) attraverso un'apposita funzione di Simulink che risolve il problema di avere per ciascun blocco lo stesso nome delle variabili. Questa funzione permette, quindi, di estendere facilmente il numero massimo di zone.

Il modello di ogni zona è composto da due blocchi fondamentali, il blocco edificio e il blocco distribuzione (in questa fase non viene utilizzato in quanto non sono presenti gli impianti).

Il blocco edificio, come si evince dalla Figura 260 è composto a sua volta da due blocchi principali, uno per il calcolo della temperatura interna e uno per il calcolo del fabbisogno termico teorico mediante il metodo RTS dell'Ashrae, descritto dettagliatamente nel Report RdS/2010/251 "ODESSE: simulazione dinamica del sistema edificio-impianti per la climatizzazione estiva".

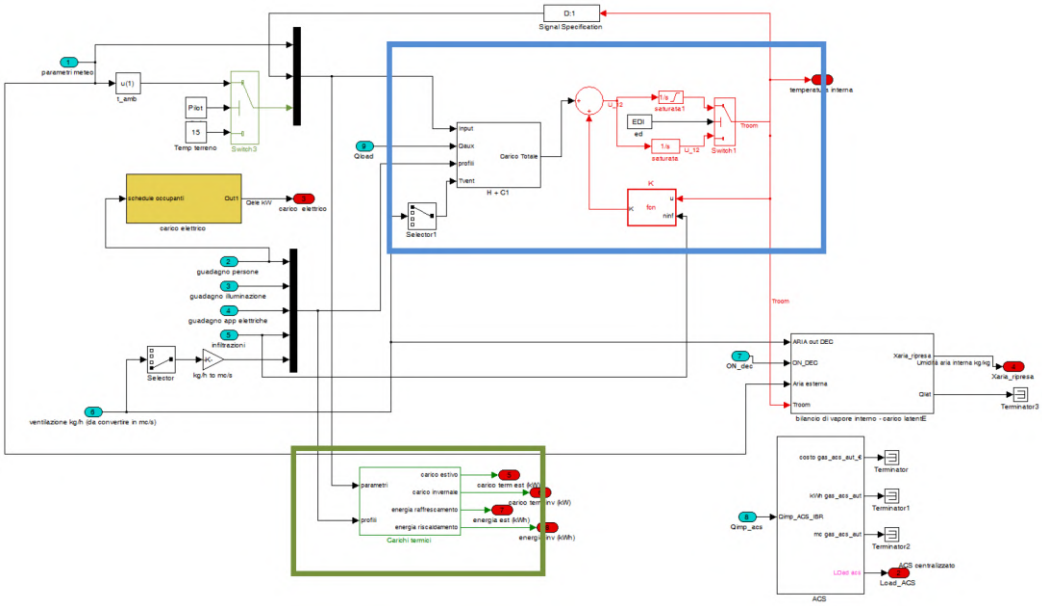
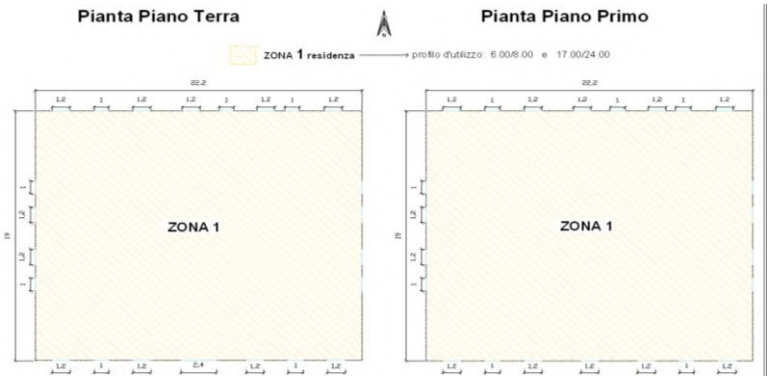


Figura 260. Schema funzionale del blocchi principali

Caratteristiche edificio monozona – multizona

L'edificio oggetto di studio è stato analizzato e simulato in una prima fase come un "monozona", vale a dire come un parallelepipedo dalla superficie in pianta pari circa a 420 m^2 e dal volume di circa 2500 m^3 (6 m altezza; 22,2 m lunghezza; 19 m profondità)

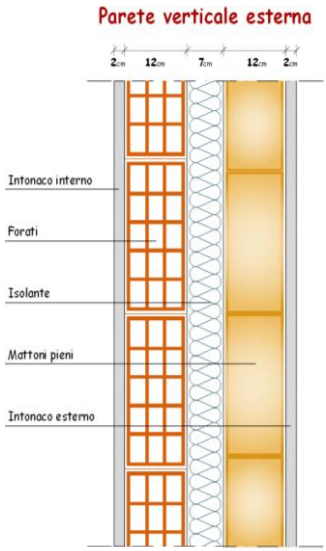
L'orientamento delle superfici verticali esterne, come dalla figura di seguito riportata, evidenzia una maggiore percentuale di superfici trasparenti sui fronti nord e sud.



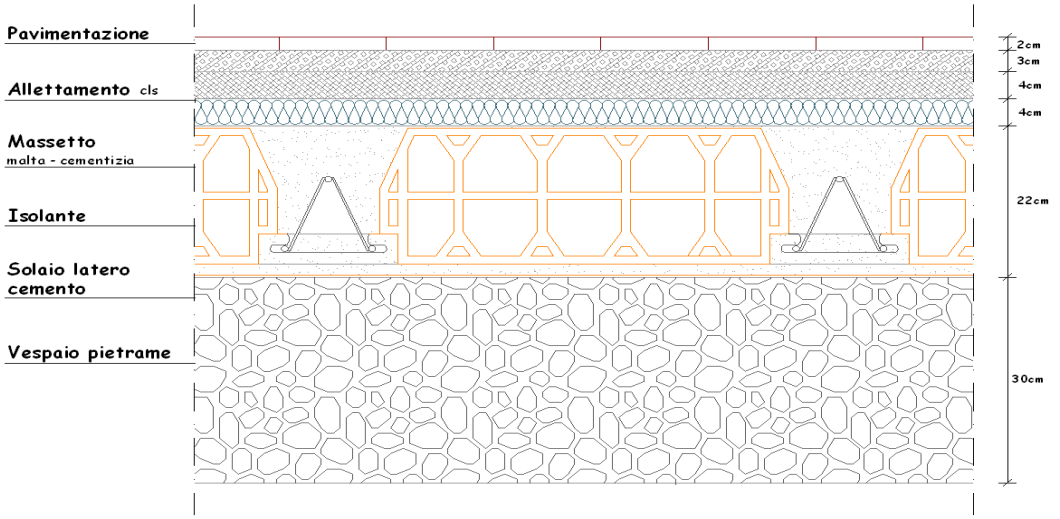
Le superfici esterne verticali ed orizzontali dell'edificio, che definiscono l'involucro, e il solaio intermedio sono costituite da elementi le cui caratteristiche termofisiche sono riportate nelle figure e tabelle che seguono. In particolare il solaio intermedio è computato esclusivamente nel calcolo della capacità termica dell'intero edificio.

Caratteristiche strutturali parete esterna

strato	Materiale (codice ODESSE)	s	λ	ρ	cs	resistenza	hi	he	trasmittanza	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m2K) - 24h		
		(m)	(W/m²K)	(Kg/m³)	(KJ/kgK)	(m²K/W)	(W/m²K)	(W/m²K)	(W/m²K)	tot	esterna	interna
I							7.70					
1	Intonaco interno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Forato (107)	0.12	0.590	1600	0.84	0.203						
3	Isolante (159)	0.07	0.040	30	1.34	1.750						
4	Mattoni (109)	0.12	0.900	2000	0.84	0.133						
5	Intonaco esterno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
E								25				
	Totale	**0.35**				**2.31**			**0.432**	**179.83**	115.69	64.14



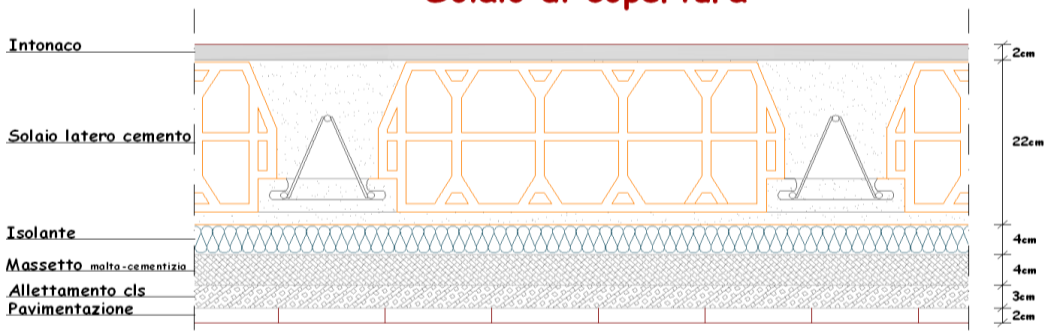
Solaio di calpestio



Caratteristiche strutturali solaio calpestio *(no pilotis)*

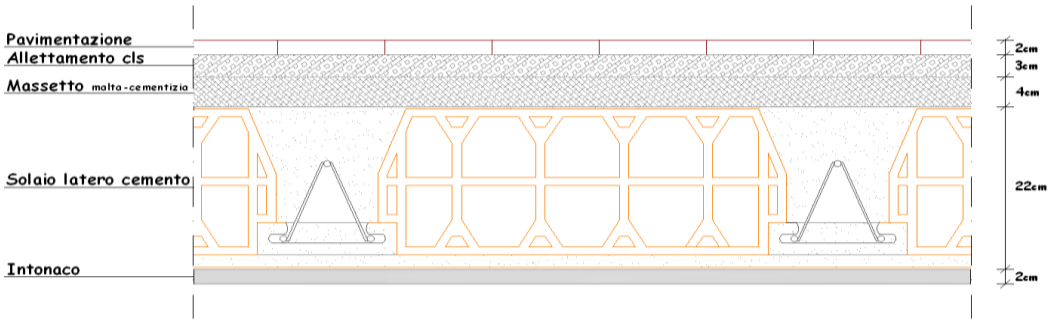
strato	Materiale (codice ODESSE)	s	λ	ρ	cs	resistenza	hi	he	trasmittanza	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m2K) - 24h		
		(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(KJ/kgK)	(m²K/W)	(W/m²K)	(W/m²K)	(W/m²K)	tot	esterna	interna
I							**5.88**					
1	Piastrella porcellana (237)	0.02	1.000	2300	0.80	0.020						
2	Allettamento cls (57)	0.03	0.580	1400	0.88	0.052						
3	Malta di sottofondo (99)	0.04	1.400	2000	0.67	0.029						
4	Isolante (175)	0.04	0.032	50	1.60	1.250						
5	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
6	Vespaio (147)	0.15	0.700	1400	1.09	0.214						
E								**0**				
	Totale	**0.50**				**2.05**			**0.487**	**177.66**	120.30	57.36

Solaio di copertura



Caratteristiche strutturali solaio copertura												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s	λ	ρ	cs	resistenza	hi	he	trasmittanza	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m2K) - 24h		
		(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(KJ/kgK)	(m²K/W)	(W/m²K)	(W/m²K)	(W/m²K)	tot	esterna	interna
I							10.00					
1	Intonaco (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
3	Isolante (175)	0.04	0.032	50	1.60	1.250						
4	Malta di sottofondo (99)	0.04	1.400	2000	0.67	0.029						
5	Allettamento cls (57)	0.03	0.580	1400	0.88	0.052						
6	Pavimento cls (21)	0.02	1.480	2200	0.88	0.014						
E								25				
	Totale	0.37				1.83			0.546	175.12	103.32	71.80

Solaio intermedio



Caratteristiche strutturali solaio intermedio												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s	λ	ρ	cs	resistenza	hi	he	trasmittanza	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m2K) - 24h		
		(m)	(W/mK)	(Kg/m³)	(KJ/kgK)	(m²K/W)	(W/m²K)	(W/m²K)	(W/m²K)	tot	esterna	interna
I							10.00					
1	Piastrella porcellana (237)	0.02	1.000	2300	0.80	0.020						
2	Allettamento cls (57)	0.02	0.580	1400	0.88	0.034						
3	Malta di sottofondo (99)	0.02	1.400	2000	0.67	0.014						
4	Solaio laterocemento (156)	0.22	0.688	1800	1.00	0.320						
5	Intonaco (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
E								5.88				
	Totale	0.30				0.69			1.455	132.80	74.83	57.97

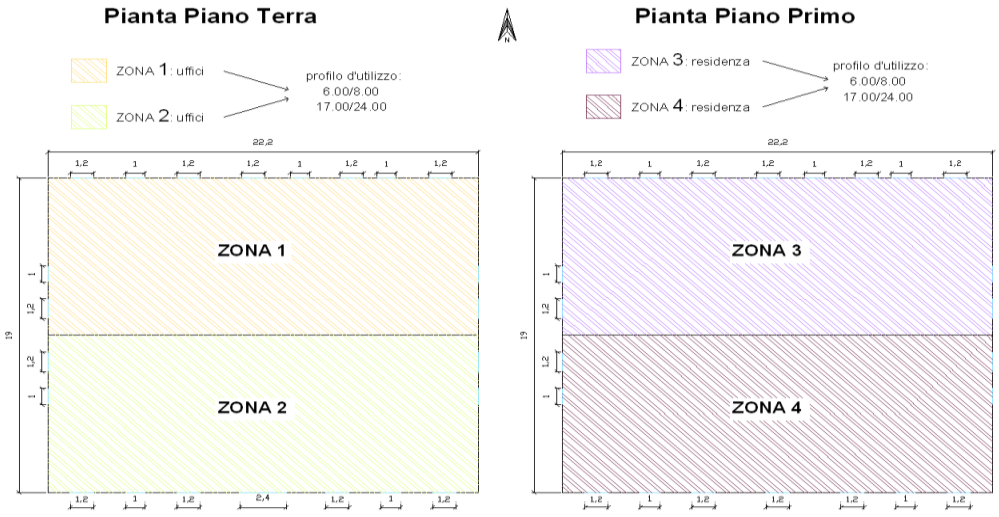
TIPOLOGIE INFISSI (alluminio-doppio vetro)						
	(W/m²K)	lunghezza	altezza	superficie	perimetro telaio/vetro	%telaio
INFISSO tipo 1		1,2	1,4	1,68		
Utot	2,54					
VETRO 1		0,5	1,2	1,2		
Ug	2,450					
TELAIO 1				0,48		0,29
Uf	1,9					
l 1		0,5	1,2		6,8	
ψl	0,06					
INFISSO tipo 2		1	1,4	1,4		
Utot	2,55					
VETRO 2		0,4	1,2	0,96		
Ug	2,450					
TELAIO 2				0,44		0,31
Uf	1,9					
l 2		0,4	1,2		6,4	
ψl	0,06					
INFISSO tipo 3		2,4	2,2	5,28		
Utot	2,49					
VETRO 3		0,65	2	3,9		
Ug	2,450					
TELAIO 3				1,38		0,26
Uf	1,9					
l 3		0,65	2		15,9	
ψl	0,06					

Per quanto riguarda le superfici trasparenti sono state considerate tre tipologie di infissi, uguali tra di loro per caratteristiche termo fisiche, i cui valori di trasmittanza termica di vetro (Ug), di telaio (Uf), e del coefficiente lineico di accoppiamento tra telaio e vetro (Ψl) sono riportati nella Tabella che segue, ma differiscono per dimensioni.

	ZONA Unica			
	Nord	Sud	Est	Ovest
n. tipo 1	10	9	4	4
n. tipo 2	6	4	4	4
n. tipo 3	0	1	0	0
sup_tot	133,2	133,2	114	114
sup_opaca	108	107,2	101,68	101,68
sup_vetro	17,76	18,54	8,64	8,64
sup_telaio	7,44	7,46	3,68	3,68
sup_infisso	25,2	26	12,32	12,32
perimetro telaio/vetro	106,4	102,7	52,8	52,8
TRASMITTANZA Uw	2,541	2,529	2,543	2,543

Inoltre nelle simulazioni sono stati considerati dei profili di utilizzo relativi alla presenza di persone per m^2, alla potenza di illuminazione installata per m^2 e al valore di infiltrazioni rispetto al volume.

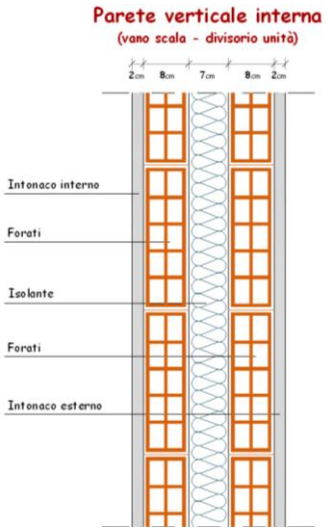
In una seconda fase è stato considerato lo stesso edificio, ma diviso in quattro zone, due per piano, con una linea di sezione est-ovest, in modo da ottenere le zone caratterizzate da un maggiore orientamento sui lati nord e sud. Le zone al piano terra sono denominate ZONA 1 e ZONA 2, quelle al primo piano ZONA 3 e ZONA 4.



Ognuna delle 4 zone è delimitata verticalmente da tre lati esterni ed uno interno. Le caratteristiche termo fisiche delle pareti verticali esterne sono le stesse dell'edificio studiato come "monozona"; la partizione interna, quella cioè lungo la linea di sezione est-ovest, è invece definita come riportato di seguito.

Le superfici orizzontali sono considerate con le medesime caratteristiche termo fisiche dell'edificio analizzato come "monozona".

Caratteristiche strutturali parete interna (vano scala divisorio tra appartamenti)												
strato	Materiale (codice ODESSE)	s	λ	ρ	cs	resistenza	hi	he	trasmittanza	Capacità termica UNI 13786 (kJ/m2K) - 24h		
		(m)	(W/m²K)	(Kg/m³)	(KJ/kgK)	(m²K/W)	(W/m²K)	(W/m²K)	(W/m²K)	tot	esterna	interna
I							7.70					
1	Intonaco interno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
2	Forato (107)	0.08	0.590	1600	0.84	0.136						
3	Isolante (159)	0.07	0.040	30	1.34	1.750						
4	Forato (107)	0.08	0.590	1600	0.84	0.136						
5	Intonaco esterno (97)	0.02	0.700	1400	1.09	0.029						
E								7.70				
	Totale	0.27				2.34			0.428	132.26	66.13	66.13



La differenza risiede nell'attribuzione del tipo di solaio al ruolo che svolge: il solaio di calpestio del monozona diventa solaio di calpestio delle sole zone 1 e 2; il solaio intermedio invece sarà solaio di copertura delle zone 1 e 2, mentre verrà considerato come solaio di calpestio delle zone 3 e 4; il solaio di copertura verrà considerato come tale nelle sole zone 3 e 4.

Coerentemente con quanto detto, anche le superfici trasparenti verranno considerate secondo la distinzione per zone precedentemente descritta.

Nella tabella seguente sono riportati i dati riguardanti le tipologie, le superfici e i valori di trasmittanza termica che caratterizzano i differenti orientamenti di ognuna delle 4 zone.

	ZONA 1				ZONA 2				ZONA 3				ZONA 4			
	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest	Nord	Sud	Est	Ovest
n. tipo 1	5	0	1	1	0	4	1	1	5	0	1	1	0	5	1	1
n. tipo 2	3	0	1	1	0	2	1	1	3	0	1	1	0	2	1	1
n. tipo 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sup_tot	66,6	0	28,5	28,5	0	66,6	28,5	28,5	66,6	0	28,5	28,5	0	66,6	28,5	28,5
sup_opaca	54	0	25,42	25,42	0	51,8	25,42	25,42	54	0	25,42	25,42	0	55,4	25,42	25,42
sup_vetro	8,88	0	2,16	2,16	0	10,62	2,16	2,16	8,88	0	2,16	2,16	0	7,92	2,16	2,16
sup_telaio	3,72	0	0,92	0,92	0	4,18	0,92	0,92	3,72	0	0,92	0,92	0	3,28	0,92	0,92
sup_infisso	12,6	0	3,08	3,08	0	14,8	3,08	3,08	12,6	0	3,08	3,08	0	11,2	3,08	3,08
TRASMITTANZA Uw	2,541		2,543	2,543		2,521	2,543	2,543	2,541		2,543	2,543		2,540	2,543	2,543

Caratteristiche edificio monozona – multizona

Di seguito si riportano i risultati del confronto fra il modello monozona simulato con ODESSE e con TRNSYS.

La tabella seguente riporta i fabbisogni energetici invernale ed estivo (in kWh) nelle ipotesi previste dalle norme UNI TS 11300, ovvero considerando una richiesta termica giornaliera continua per temperature di riferimento pari a 20 °C in inverno e 26 °C in estate.

	Fabbisogno termico invernale	Fabbisogno termico estivo
ODESSE	22990	7879
TRNSYS	24520	7392
ERRORE	6,7%	6,2%

L'errore del 6% circa sia in fase di riscaldamento sia raffrescamento evidenzia una ottima concordanza fra i due software.

Per poter valutare l'approssimazione introdotta dall'ipotesi di assenza di interazione fra le varie zone, l'edificio multizona descritto nel paragrafo precedente è stato simulato anche con il software Trnsys che consente, invece, di modellare un edificio multizona con le zone termicamente interagenti fra loro. In particolare per valutare più in dettaglio i risultati ottenuti con Odesse Multizona il confronto è stato eseguito con l'edificio di Trnsys simulato sia con interazione fra le zone sia senza e con lo stesso file meteo *RomaCiampino.epw*.

La tabella seguente mostra i fabbisogni energetici annuali (in kWh) di ciascuna zona, invernali ed estivi, e l'errore relativo.

	Fab_inv_Z1	Fab_inv_Z2	Fab_inv_Z3	Fab_inv_Z4	Fab inv_tot
ODESSE	6466	6580	7750	7237	28033
TRNSYS	5277	4710	8304	7161	25452
TRNSYS_NI (NO INTERAZIONE)	5780	4986	7717	6711	25194
errore OD -TR	*18,4%*	*28,4%*	*7,1%*	*1,1%*	*9,2%*
errore OD -TR_NI	*10,6%*	*24,2%*	*0,4%*	*7,3%*	*10,1%*

	Fab_est_Z1	Fab_est_Z2	Fab_est_Z3	Fab_est_Z4	Fab est_tot
ODESSE	654	1480	3244	3876	9254
TRNSYS	631,3	1011	2686	3538	7866,3
TRNSYS_NI (NO INTERAZIONE)	375,2	866,1	3329	4091	8661,3
errore OD -TR	*3,5%*	*31,7%*	*17,2%*	*8,7%*	*15,0%*
errore OD -TR_NI	*42,6%*	*41,5%*	*2,6%*	*5,5%*	*6,4%*

Si può osservare mediamente un errore contenuto al di sotto del 20%, tranne la zona 2 che presenta un anomalia dovuta ad un problema di lettura del dato meteo non corretto. Ciò è evidenziato anche dai confronti fra i consumi totali invernali ed estivi che indicano uno scostamento del 10% in inverno e del 6,5% in estate.

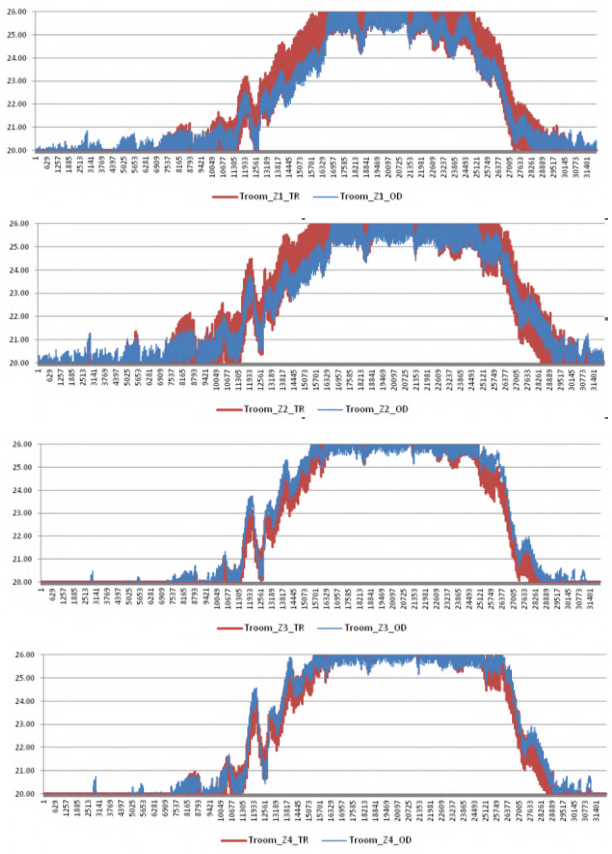


Figura 261. Andamento delle temperature interne nelle 4 zone

In Figura 261 sono riportati i grafici relativi alle temperature interne, il cui andamento è di fondamentale importanza per lo sviluppo futuro di tale modello con l'integrazione degli impianti. Tali andamenti evidenziano la buona congruenza fra Trnsys e Odesse.

In particolare le differenze maggiori evidenziate dalla diversa ampiezza di oscillazione del segnale si riscontrano nei mesi di transizione fra la stagione di riscaldamento e quella di raffrescamento, e possono essere trascurate in quanto non hanno nessuna influenza nel calcolo dei fabbisogni termici.

Il motivo di tale diversità risiede nella diversa formulazione dell'equazione differenziale della temperatura e nel diverso approccio al calcolo della capacità termica della zona (Report RdS/2011/178 "Integrazione di layout impiantistici nella piattaforma di simulazione ODESSE (Optimal DESignfor Smart Energy").

Tenendo conto dell'analisi effettuata e dei risultati ottenuti si può affermare che l'ipotesi di considerare un modello di edificio multizona dove le diverse zone in cui è suddiviso l'edificio non interagiscono termicamente fra di loro può essere ritenuta accettabile, in quanto introduce un'approssimazione che rientra nella classe di errore che in genere commettono i software di simulazione dinamica.

Ottimizzazione del codice e aggiornamento interfaccia grafica della piattaforma ODESSE

Durante la presente annualità del Programma, lo sviluppo del software ODESSE è continuato, ed in particolare si è pensato ad una ottimizzazione del codice.

Allo scopo di ottimizzare l'interfaccia è stata avviata una riprogettazione lato utente del software ODESSE, utilizzando linguaggio Java supportato da NetBeas, questo per garantire una maggiore compatibilità con i nuovi sistemi operativi ed uno snellimento degli elementi grafici presenti nelle pagine visualizzate dall'utente, fornendo, in questo modo, uno strumento semplificato ma completo; anche nell'ottica del passaggio ad un software di simulazione multizona, la nuova interfaccia grafica, in fase di progettazione, renderà più agevole il passaggio a simulazioni più complesse.

L'aggiornamento del codice è consistito principalmente in una revisione degli algoritmi di computazione che si occupano di calcolare tutti i valori di interazione termica tra edificio ed ambiente: trasmittanza pareti verticali ed orizzontali, trasmittanza infissi, capacità termica areica delle partizioni interne ed esterne sia verticali, sia orizzontali, etc.

E' stata inoltre introdotta una modifica nell'output delle simulazioni: oltre ad un andamento grafico delle temperature, viene fornito un file Excel con vari parametri di simulazione. L'output, quindi, sarà variabile in base al tipo di impianto scelto dall'utente: nella parte iniziale, infatti, comprenderà sempre le grandezze relative all'edificio, con misura di temperature, interna ed esterna, ed il fabbisogno termico. In caso di attivazione di un impianto verranno scritte, a seguire, le variabili relative a tale impianto, ad eventuali costi e ad energia utilizzata.

In una prima fase di progettazione della piattaforma ODESSE, l'ambiente da simulare (sistema edificio-impianto) era orientato a edifici *monozona*, come descritto nei rapporti tecnici precedenti. Alla luce dello sviluppo del modello di edificio multizona e nell'ambito degli aggiornamenti effettuati per l'ottimizzazione dell'interfaccia del software ODESSE per l'edificio monozona, si è pensato di predisporre la stessa interfaccia ad un suo futuro utilizzo a supporto del modello di edificio multizona. Per questo motivo si è passati da un sistema di distribuzione del condizionamento termico distinta per ogni tipologia d'impianto ad un sistema di distribuzione unica. In questo modo sarà possibile implementare più impianti termici per ogni edificio, distinguendo le varie tipologie d'impianto ma utilizzando una unica rete di distribuzione.

Per raggiungere quest'obiettivo sono state apportate delle modifiche al modello implementato in Simulink e all'interfaccia JAVA. Si è cercato, inoltre, di mantenere la compatibilità con i vecchi progetti già implementati e salvati con la prima versione del simulatore, in modo da poter continuare ad utilizzare i dati di progetti già esistenti.

Una descrizione dettagliata delle attività e dei risultati ottenuti è contenuta nel Report "Sviluppo di uno strumento per l'analisi di reti energetiche complesse nel settore civile" [RdS/2012/078].

Le attività svolte dall'Università di Palermo, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), riferite all'obiettivo D si sono concentrate sul tema della climatizzazione dei centri di calcolo. Infatti, i costi degli impianti di raffreddamento sono una quota importante dei costi di gestione che la imprese operanti nell'ambito delle telecomunicazioni devono sostenere. Inoltre tali sistemi operano continuamente durante tutto l'anno. Infine, un altro aspetto importante è legato alle condizioni dell'aria che vengono mantenute all'interno dei centri di calcolo al variare delle quali è possibile pensare ad altre modalità di raffreddamento energeticamente più efficienti ed economiche. Le condizioni citate sono tali da spingere gli operatori del settore verso tecnologie di produzione del freddo alternative a quelle convenzionali [Report RdS/2012/081].

La prima fase delle attività è stata incentrata sull'analisi e sulla definizione di un modello di calcolo per la simulazione dei carichi termici di una sala CED. In un primo momento, come caso studio è stato scelto il centro di calcolo dell'Università di Palermo. A causa però di difficoltà incontrate nel reperimento di dati e informazioni necessari per la definizione del modello matematico, si è scelto di optare per un'altra soluzione ed in particolare la scelta è ricaduta sulla sala CRESCO del centro di calcolo ENEA a Portici sul quale sono state effettuate tutte le successive elaborazioni estese anche ad altre due località climatiche. In tal modo i risultati ottenuti sono certamente di maggiore affidabilità e rappresentatività. Le indicazioni ottenute sono anche di notevole interesse per la definizione di interventi specifici e in sale macchine di caratteristiche simili.

- *Analisi delle soluzioni impiantistiche convenzionali, dei carichi elettrici e termici e modellizzazione: Il centro di calcolo del SIA di Palermo*

Per poter valutare correttamente i carichi elettrici e termici che caratterizzano una sala CED, il gruppo di lavoro si è impegnato nello studio e monitoraggio dell'attuale stato di fatto della "Sala Macchine" del Sistema Informativo d'Ateneo (SIA) dell'Università degli Studi di Palermo.

Il lavoro ha previsto la caratterizzazione meteo climatica dell'area urbana di Palermo, l'analisi della tipologia costruttiva dell'edificio che ospita la sala e l'analisi degli impianti e delle utenze installate presso la sala CED.

La sala CED del SIA è sita in viale delle Scienze, con posizione geografica 38°06'N e 13°20'E. L'edificio ospitante è stato costruito nel 1976 e si articola su tre elevazioni: piano seminterrato, piano terra e primo piano; i piani sono raggiungibili tramite una scala principale. La struttura presenta una pianta rettangolare con una superficie per piano di circa 790 m^2.

Il piano terra ospita una serie di locali adibiti ad uffici ed un locale denominato Sala Macchine, che ospita i server del SIA. Il seminterrato è caratterizzato dalla presenza di alcuni locali magazzino e dai locali tecnici; tra questi ultimi un locale adibito a centrale termica, la cabina elettrica coi relativi sistemi di emergenza e un locale ospitante un generatore d'emergenza diesel. I locali del piano primo sono totalmente destinati ad uso ufficio.

La sala CED, ovvero la Sala Macchine si trova al piano terra dell'edifico ed ha una superficie in pianta di 180 m^2; tre degli elementi di involucro verticali confinano con zone interne, mentre quella orientata a Nord-Ovest confina con l'esterno.

La struttura portante dell'edificio è costituita da pilastri, sui quali sono stati assemblati dei pannelli prefabbricati in calcestruzzo con uno strato di amianto in mezzeria. Lo spessore delle pareti perimetrali è di circa 20 cm, mentre le pareti interne sono composte da cartongesso con uno spessore di circa 15 cm; per ogni elemento di involucro sono state determinate le trasmittanze termiche e per ogni esposizione i metri quadri di involucro opaco rispetto alle superfici vetrate (vedi Report Finale).

Dopo un sopralluogo circa lo stato di fatto dell'impianto elettrico dell'intero edificio e della sala CED è stata rilevata la mancanza di uno schema unifilare, di un progetto e/o di una relazione dell'impianto elettrico dell'intero edificio e di un inventario delle apparecchiature informatiche presenti. Inoltre non è stato possibile risalire alla maggior parte delle tipologie di utenza collegate ai quadri elettrici per mancanza di corretta indicazione tra interruttori ed utenze servite. La presenza di numerose multiprese e cavi sparsi ha reso impossibile l'identificazione di adeguati punti di misura. Per tali motivi non è stato possibile effettuare una misurazione diretta dei carichi globali assorbiti pertinenti la sala CED, nonché dei relativi impianti di climatizzazione.

Per quanto attiene le unità trattamento aria nei locali della sala CED, sono presenti le seguenti macchine:

- N.1 WESTINGHOUSE, Modello UK180W1Q (21,9 kW);
- N.1 STULZ, Modello CCM 302 A (30 kW);
- N.1 AMICO, Modello SDA0601A(C) (18,1 kW);
- N.4 POMPE DI CALORE HAIER, Modello AB18CS1ERA (5 kW cad.).

Per poter ipotizzare il carico termico che interessa la sola Sala Macchine si è ricorso ad una valutazione di massima basata sulla determinazione della potenza elettrica totale delle apparecchiature che insistono su una porzione limitata della sala CED (19 m^2) e successiva estensione all'intera Sala.

Durante lo studio inoltre è stato possibile isolare soltanto una linea di alimentazione afferente ad una UTA (macchina STULZ); il monitoraggio dei consumi elettrici relativi è in atto.

Esiste un sistema di monitoraggio dell'assorbimento elettrico totale dell'edificio facente parte del sistema di gestione dell'impianto di UPS generale, ma l'accesso a tale sistema tuttavia è riservato solo alla ditta di manutenzione dell'UPS; il sistema è stato attivato dietro nostra richiesta solo recentemente.

Per quanto riguarda la conoscenza della potenza di calcolo istantanea impegnata dalla macchine del CED, il SIA è dotato di un sistema di monitoraggio di non facile utilizzo denominato Spacewalk. Il sistema infatti monitora solo un terzo delle apparecchiature presenti nella Sala Macchine (solo macchine Linux), è stato avviato solo da fine maggio 2012 e fornisce i dati in forma disaggregata ovvero non permette di cumulare informazioni per gruppi omogenei di macchine. Inoltre tale sistema non fornisce un'effettiva misurazione della potenza di calcolo impegnata (FLOPS), ma una semplice indicazione sulla potenza impegnata dalla CPU in termini percentuali.

Tale stato di fatto ha quindi impedito una misurazione diretta dei carichi assorbiti solo nella sala CED in quanto non è stato possibile:

- valutare il carico elettrico delle macchine utilizzatrici;
- valutare il carico elettrico delle UTA;
- valutare il carico elettrico della sola sala CED.

Per tali ragioni è stato sviluppato un modello in ambiente TRNSYS che simula dinamicamente lo stato di fatto del sistema edificio-impianto. Il modello è stato calibrato grazie al monitoraggio indoor di temperatura ed umidità, ed al censimento delle potenze elettriche impegnate per le apparecchiature e l'illuminazione dell'intero edificio. Le temperature medie e le escursioni termiche simulate dal modello risultano essere verosimili alla temperature monitorate.

I risultati ottenuti dalla simulazione dinamica hanno evidenziato il sottodimensionamento degli impianti di climatizzazione sia della sala CED che per l'intero edificio.

- *Analisi delle soluzioni impiantistiche convenzionali, dei carichi elettrici e termici e modellizzazione: La sala CRESCO del centro di calcolo ENEA a Portici*

Per questo caso studio è disponibile un database contenente i dati di assorbimento dei cluster di macchine installate e dei gruppi di refrigerazione relativo al periodo di monitoraggio dal 30.05.2011 al 26.07.2011.

Il modello utilizzato è stato creato e tarato sulla base delle informazioni relative alle macchine installate, alle caratteristiche dell'edificio e ai dati di monitoraggio dei consumi elettrici della sala.

Per ciò che concerne l'impianto di refrigerazione della sala, il sistema vede la presenza di cinque gruppi di raffreddamento ad espansione diretta del tipo EMERSON Liebert Hiross HPM M50 con condensazione ad aria con COP elettrico nominale pari a 3,59. Le macchine frigorifere per il condizionamento del locale servono solo la sala CRESCO. Il ricambio dell'aria interna alla sala CRESCO è pari a 2 volumi totali/ ora.

La simulazione dell'edificio è stata effettuata utilizzando il TYPE 56 nel quale sono state introdotte tutte le caratteristiche dell'edificio reale. L'impianto di raffreddamento è stato introdotto collegando l'edificio con un gruppo di refrigerazione di potenza pari a cinque volte la potenza dell'unità di raffreddamento HPM M50 per un totale di 275 kW. La portata d'aria totale che interessa la sala è di 61200 m^3/h equivalente a circa 150 L/h. Inoltre è stata prevista un'ulteriore portata d'aria esterna introdotta come infiltrazione pari a 2 ricambi all'ora. La soluzione impiantistica attuale verrà indicata di seguito con la sigla ST.

Il carico interno all'edificio è stato introdotto come input ovvero esso è pari al consumo istantaneo di elettricità legato alle macchine per l'elaborazione dei dati e fornito tramite un file di lettura contenente i dati di monitoraggio registrati presso il centro di Portici. In particolare sono stati utilizzati i dati di assorbimento delle macchine installate e dei gruppi di refrigerazione a fini di poter operare un confronto con i risultati di simulazione. Il periodo considerato in questa fase va dal 30.05.2011 al 26.07.2011. Allo scopo di tarare il modello di calcolo, sono state svolte diverse simulazioni al variare di alcuni parametri di settaggio dei vari tipi utilizzati.

Il carico di raffreddamento e il consumo di elettricità monitorati sono abbastanza costanti nel tempo e comunque indipendenti dalle variazioni della temperatura esterna. La potenza di raffreddamento media richiesta è di circa 160 kW.

Successivamente, il modello è stato esteso all'intero anno, per tre diverse località, Portici, Milano e Palermo. I file climatici utilizzati sono quelli Meteonorm presenti nella libreria di TRNSYS, rispettivamente di Napoli, Milano Linate e Palermo Punta Raisi. In questa fase, l'analisi è stata svolta spostando virtualmente il centro di Portici nelle altre due località considerate, ovvero i consumi elettrici dovuti all'elaborazione dei dati sono quelli relativi al monitoraggio svolto presso Portici. Lo stesso vale per le macchine di refrigerazione e per l'edificio che ospita il centro di calcolo.

- *Sviluppo di un modello per la simulazione oraria di componenti e sistemi che sfruttano il raffrescamento evaporativo indiretto e il free cooling per diverse configurazioni utenza - clima*

Il passo successivo è stato la creazione di un modello per la simulazione di due tipologie di impianti volti al risparmio energetico.

Sono state valutate due diverse soluzioni alternative che fanno uso del processo di raffreddamento evaporativo:

- La prima tipologia è caratterizzata dall'utilizzo di un sistema di freecooling integrato all'interno dei gruppi di raffreddamento. In particolare, sono state introdotte nel modello le caratteristiche di un sistema di refrigerazione prodotto dalla stessa casa costruttrice delle macchine attualmente installate nel centro avente anche l'opzione freecooling. Questa soluzione sarà identificata con la sigla ST – FC;
- La seconda tipologia impiantistica analizzata successivamente fa uso del processo di raffreddamento evaporativo indiretto, attuando un trattamento diretto dell'aria presente nel centro di calcolo. Questa soluzione sarà identificata con la sigla IEC.

In tutte le analisi, si è assunto un tasso di ricambio dell'aria pari a 2 volumi/ora. Non è stata considerata l'aliquota di carico latente, essendo comunque di bassissima entità.

Le due soluzioni proposte sono state simulate per tre diversi climi ed in particolare per i siti di Milano, Portici e Palermo. La prima soluzione è stata simulata facendo riferimento alle caratteristiche delle unità di raffreddamento Liebert Hiross HPM M50 aventi l'opzione del free cooling integrato (serie F).

In particolare la singola unità è costituita da un refrigeratore ad acqua in cui è possibile collegare idraulicamente evaporatore e condensatore al fine di ridurre i consumi di elettricità nei momenti in cui la temperatura dell'aria

esterna è sufficientemente bassa. Il numero di unità previste in questa soluzione è uguale a cinque così come nel caso reale del centro di Portici.

Anche in questo caso è stato creato un progetto TRNSYS per la simulazione dell'impianto. L'intervallo di tempo considerato in questo caso è l'intero anno. Le caratteristiche dell'edificio sono quelle della sala CRESCO così come il carico interno dovuto all'utilizzo delle macchine per l'elaborazione dei dati.

La seconda soluzione impiantistica considerata è quella caratterizzata dall'utilizzo del raffreddamento evaporativo indiretto di seguito denominata con la sigla IEC (Indirect Evaporative Cooling). In questa soluzione il raffreddamento della sala è attuato ricircolando una portata d'aria su un particolare scambiatore evaporativo comunemente chiamato economizzatore. Nel primario dello scambiatore fluisce l'aria di processo che viene utilizzata per raffreddare la sala, mentre sul secondario fluisce l'aria esterna nella quale viene spruzzata acqua al fine di abbassarne la temperatura. La potenza di raffreddamento è dipendente dalla temperatura a bulbo umido dell'aria esterna.

L'impianto simulato prevede l'utilizzo del raffreddamento evaporativo indiretto come sistema di principale. Un sistema convenzionale ausiliario interviene invece nei momenti di carico massimo.

Nel modello è presente anche il sistema di controllo della temperatura interna alla sala nella quale è impostata una temperatura di set point di 27 °C. Il sistema funziona regolando le portate d'aria sul lato primario e secondario in modo da mantenere in ambiente la temperatura desiderata. Quando il raffreddamento evaporativo indiretto non è sufficiente il sistema di controllo attiva il gruppo di refrigerazione convenzionale.

Per il sito di Palermo il sistema è in grado di raffreddare il locale senza l'ausilio del gruppo di raffreddamento convenzionale. L'efficienza di scambio termico media nel periodo è pari a 69%.

Nella situazione peggiore, ovvero quando la temperatura a bulbo umido è elevata, la potenza del gruppo di raffreddamento convenzionale (ST) è di circa 120 kW mentre circa 50 kW di potenza frigorifera sono comunque forniti dall'economizzatore IEC.

Le soluzioni proposte sono state infine analizzate per le tre località considerate sulla base dei bilanci energetici annuali e infine confrontate tra loro.

- *Analisi tecnico economica relativa alla applicabilità di tecnologie innovative per la climatizzazione delle sale CED*

L'energia frigorifera totale fornita dai vari sistemi per i nove casi considerati è pari in tutti i casi a circa 1380 MWh. Il sistema il sistema di raffreddamento evaporativo indiretto permette di coprire una quota maggiore del fabbisogno di energia frigorifera (80-90%) rispetto a quello di free cooling. In questo caso infatti la quota di copertura del sistema è variabile da un minimo del 20 % nel caso del sito di Palermo ad un massimo del 40% relativo al sito di Milano.

Un altro aspetto importante per il confronto tra le varie soluzioni è relativo alla riduzione della potenza installata del refrigeratore. La capacità massima richiesta infatti è pari a circa 30, 34 e 50% di quella del relativo sistema convenzionale rispettivamente per il sito di Milano, Portici e Palermo. Nell'ottica di una nuova installazione, ciò permetterebbe una riduzione significativa dei costi iniziali.

I risultati delle simulazioni sono stati elaborati e riassunti in diversi grafici che riportano il COP elettrico globale medio annuale dell'intero sistema costituito dall'impianto convenzionale e da quello innovativo, la spesa energetica globale e i risparmi dovuti alla soluzione innovativa.

Dall'esame dei risultati di simulazione si riscontra una superiorità della soluzione con raffreddamento evaporativo indiretto per la quale si hanno i massimi risparmi monetari. Nei calcoli è stato assunto un costo specifico dell'elettricità pari a 0,16 €/kWh ed un costo di investimento specifico per il gruppo di refrigerazione convenzionale di 400 €/kW.

Il tempo di ritorno dell'investimento è calcolato sulla base degli extracosti di installazione degli impianti innovativi rispetto a quello convenzionale preso come riferimento. Si noti come il tempo di ritorno dell'investimento sia sempre inferiore ad un anno per la soluzione ST + IEC indipendentemente dal sito scelto. La soluzione ST + FC risulta invece un po' meno vantaggiosa per il sito di Palermo avendo tempi di ritorno dell'investimento che vanno da un minimo di 2 anni ad un massimo di 6 anni rispettivamente per un extracosto specifico di investimento di 100 €/kW e 300 €/kW. Il sito dove si raggiungono tempi di ritorno minori è quello di Milano.

Si fa notare che gli extracosti per l'installazione delle soluzioni impiantistiche innovative in un caso reale possono essere anche inferiori a quelli considerati portando a risultati economici ancora più vantaggiosi.

Il contributo dell'Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, riferito all'obiettivo D ha riguardato lo sviluppo e la validazione sperimentale di algoritmi per la gestione remota ottimizzata di dispositivi di microcogenerazione e micropoligenerazione, per applicazioni distribuite in utenze residenziali e del piccolo terziario, allacciate a reti termiche [Report RdS/2012/077].

Nella precedente annualità (PAR 2008-09) presso il Dipartimento di Ingegneria era stato sviluppato un ambiente di monitoraggio, controllo e gestione remota, denominato "*PoliLab*", di una rete di micro impianti di poligenerazione preesistenti distribuiti in un ampio territorio. I due impianti sperimentali, un'unità di trattamento aria con ruota essiccante interagente con una caldaia ed un microcogeneratore ed un poligeneratore costituito da un microcogeneratore che attiva termicamente una pompa di calore ad assorbimento ed elettricamente un chiller, sono rappresentativi di diverse tecnologie che hanno raggiunto la maturità commerciale e che soddisfano le richieste frigo-termo-elettriche di utenze residenziali e del piccolo terziario interagenti con reti di distribuzione locale (elettriche e termiche), e risultano operativi presso i laboratori rispettivamente dell'Università del Sannio e della Seconda Università di Napoli.

La precedente attività di ricerca ha permesso, in accordo ad un approccio da Virtual Power Plant, di incrementare la dotazione strumentale ed impiantistica dei due laboratori per perseguire i seguenti obiettivi comuni alla pregressa ed all'attuale attività, di analisi teorica e sperimentale:

- di sistemi di gestione centrale (Energy Management System) finalizzati alla minimizzazione dei costi di esercizio, al risparmio di energia primaria ed al contenimento delle emissioni climalteranti nei settori residenziale e del terziario;
- di dispositivi trigeneranti, coerentemente alle finalità di un fornitore di servizi energetici, (ESCo: Energy Service Company), che può trarre la sua redditività economica dalla fornitura e gestione unitaria di tali sistemi;
- di sistemi complessi poligeneratore/utenza ubicati presso utenti finali, quali quelli dei settori residenziali e del piccolo terziario, privi di competenze tecnico-economiche adeguate per l'ottimizzazione delle strategie di funzionamento;
- delle condizioni di operatività ottimali delle reti di distribuzione locali, non esclusivamente elettriche, che in un prossimo futuro risulteranno fortemente vulnerabili per la diffusione capillare di sistemi distribuiti di conversione energetica, con particolare riferimento alle tecnologie di sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili aleatorie e discontinue;
- dell'effettivo raggiungimento dei potenziali obiettivi di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di gas serra dei dispositivi di poligenerazione, le cui prestazioni sono negativamente influenzata sia dall'effetto taglia, che dall'intrinseca complessità di gestione.

In continuità con l'attività pregressa per il raggiungimento degli obiettivi sinteticamente riportati, la ricerca attuale ha sviluppato e validato sperimentalmente algoritmi per la gestione remota ottimizzata di dispositivi di microcogenerazione e micropoligenerazione, per applicazioni distribuite in utenze residenziali e del piccolo terziario, allacciate a reti termiche.

Particolare attenzione è stata rivolta alle modalità cosiddette di *"load sharing"*, che permettono di servire utenze diverse, caratterizzate da profili di carico giornalieri e stagionali differenziati, al fine di ottenere profili dei carichi frigo_termo_elettrici complessivi meno variabili temporalmente e di assicurare un congruo numero di ore di funzionamento annue dell'impianto. Questa modalità operativa assolve anche all'impellente necessità di far operare i dispositivi in condizioni prossime al funzionamento *"ad isola"* e potrà contribuire a contenere le perturbazioni sulle reti esterne e ad incentivare la produzione ed il consumo *"on-site"*.

Sono state considerate due utenze, una "principale" del terziario (ufficio, edificio F83 sede ENEA Casaccia)), dove sono collocate le macchine e il serbatoio di accumulo, ed una "secondaria" (residenziale) collegata alla prima attraverso una microrete elettrica e di teleriscaldamento/teleraffrescamento. Allo scopo di dare generalità alla trattazione in termini di variabili climatiche e dei costi associati ai vettori energetici sono state considerate due diverse collocazioni, Benevento e Milano.

I modelli fisici rappresentativi dei componenti e/o degli impianti considerati e la funzione obiettivo termoeconomica adottata sono stati implementati nell'ambiente di sviluppo TRNSYS, scelto al fine di avere a disposizione un software ben consolidato in analisi energetiche di questo tipo ed aperto a future variazioni e sviluppi che contemplino ad esempio tecnologie di sfruttamento delle fonti non fossili. I modelli elaborati nell'ambito delle librerie del software ("*type*"), sono stati modificati e calibrati con dati desunti dalle campagne sperimentali condotte nei due impianti dell'Università del Sannio e della Seconda Università di Napoli.

La fase di ottimizzazione ha permesso di individuare lo stato nel tempo delle variabili di controllo individuate, in particolare con riferimento agli intervalli di funzionamento dell'unità di cogenerazione. La simulazione ha

contemplato un ampio spettro di possibilità relative a diverse collocazioni geografiche, a modalità operative con o senza la condivisione dei carichi frigo_termo_elettrici (*load sharing*) tra le utenze collegate (ufficio e residenza) con la microrete e quindi immaginando l'integrazione o meno con reti di teleriscaldamento esterne.

Sono state quindi condotte delle analisi di sensitività, per valutare la dipendenza dei diagrammi di controllo, e conseguentemente delle prestazioni energetiche, economiche e d'impatto ambientale dei sistemi analizzati, al variare di alcuni parametri operativi relativi al costo dell'energia elettrica e del gas naturale, alle strategie commerciali della ESCo e quindi alle perdite di energia termica attraverso la microrete di collegamento tra le utenze.

Gli impianti sperimentali sono stati dotati di ulteriori componenti e/o dispositivi di misura per seguire i diagrammi di controllo ottenuti dalla procedura di ottimizzazione che hanno permesso l'analisi sperimentale e la validazione delle procedure.

- *Descrizione dei modelli fisici*

Il sistema analizzato (Figura 262) è costituito da un impianto di microcogenerazione, comprendente il microcogeneratore, un serbatoio di accumulo ed una caldaia di picco, installato presso un'utenza ad uso ufficio (Utenza 1). L'energia termica prodotta può poi essere trasferita ad una seconda utenza remota ad uso residenziale (Utenza 2), collegata all'impianto di microcogenerazione mediante una microrete di teleriscaldamento.

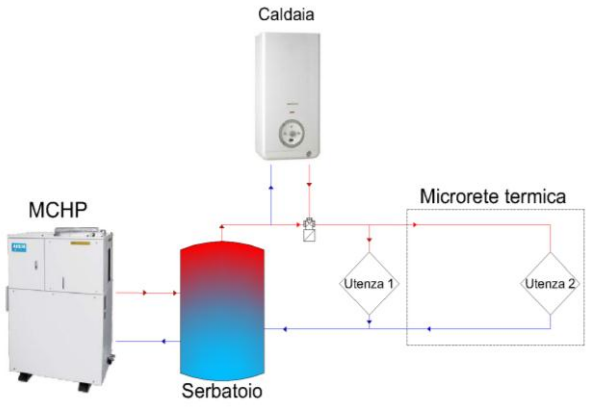


Figura 262. Impianto di microcogenerazione con microrete

Coerentemente alle caratteristiche del fluido caldo prodotto dal microcogeneratore (temperatura massima 65 °C), e per limitare l'uso della caldaia di picco, la microrete in modalità riscaldamento lavora ad una temperatura di mandata nel range 50-55 °C, dunque si è ipotizzato che l'impianto interagisca con una rete di teleriscaldamento a bassa temperatura, ovvero una piccola rete a servizio di zone residenziali di limitata estensione e dotate di terminali a bassa temperatura (fan coil). La temperatura è mantenuta nel range operativo dalla caldaia, collocata sulla mandata del serbatoio verso le utenze.

Poiché i due laboratori oggetto dell'analisi sperimentale sono ubicati in aree con caratteristiche climatiche esterne molto simili, allo scopo di dare generalità alla trattazione, si è optato per sviluppare un'analisi con riferimento a zone climatiche e caratteristiche tariffarie differenti. Per tale motivo, si sono analizzate le prestazioni del sistema descritto in due diverse collocazioni geografiche (Benevento e Milano), dimensionando opportunamente le utenze termiche per tenere conto delle diverse condizioni climatiche delle due città.

Gli ulteriori sistemi considerati sono:

- Il microcogeneratore;
- il serbatoio;
- la microrete termica;
- la caldaia;
- le macchine frigorifere ad attivazione termica.

Gli edifici che rappresentano le due utenze sono state simulate mediante l'interfaccia *"TRNBuild"* di *"TRNSYS 17"* e la relativa *"type 56"*. Il modello dei due edifici ha quindi consentito di simulare le curve di carico termico e frigorifero; per il riscaldamento ambientale a Benevento si è assunto il limite massimo consentito di 10 ore giornaliere dal 15 novembre al 31 marzo mentre per il riscaldamento ambientale a Milano si sono considerate 12 ore giornaliere dal 15 ottobre al 15 aprile, a fronte del limite massimo consentito di 14 ore.

I profili di carico elettrico delle due utenze (residenziale e ufficio) sono stati forniti mediante opportune funzioni forzanti (*"type 14"*) per i giorni tipo individuati, quali quelli riportati nelle Figure 263 e 264.

L'impianto considerato permette di servire utenze diverse, caratterizzate da profili di carico giornalieri e stagionali differenziati. È evidente che una tale scelta, penalizzante da un punto di vista dei costi d'impianto, in particolare con riferimento alle infrastrutture, trae il suo vantaggio dal fatto che un'oculata scelta del mix di utenze servite, permette di ottenere sia dei profili dei carichi frigo_termo_elettrici complessivi richiesti alla macchina meno variabili temporalmente che di assicurare un numero congruo di ore di funzionamento annue dell'impianto,

caratteristica necessaria per accelerare il recupero degli elevati capitali investiti nei complessi impianti di microcogenerazione e poligenerazione.

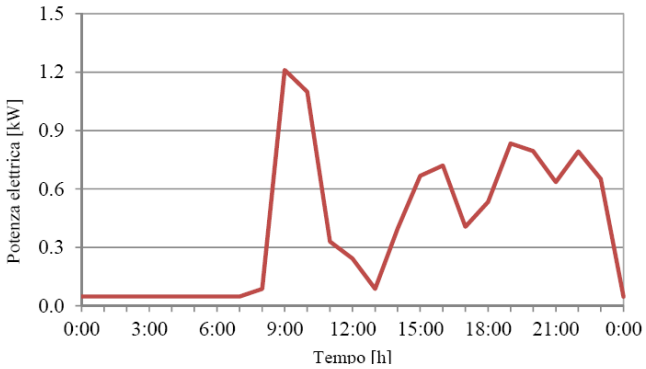


Figura 263.Curve di carico elettrico per l'utenza residenziale a Benevento per il giorno tipo 2

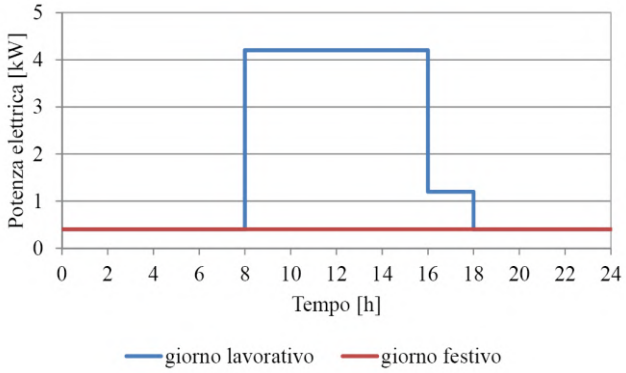


Figura 264. Curve di carico elettrico utenza ufficio Benevento

Va inoltre sottolineato come lo schema di impianto collegato alla microrete, con un'ottimizzazione dei carichi frigo_termo_elettrici globali (*"load sharing"*), assolva anche all'impellente necessità di far funzionare i dispositivi in condizioni prossime al funzionamento "ad isola". Infatti il rapido diffondersi di impianti di generazione, cogenerazione e poligenerazione distribuiti sul territorio pone serie difficoltà di gestione delle reti territoriali di distribuzione e trasmissione dei vettori energetici, in particolare quelle elettriche. Questo elemento risulta aggravarsi sia per la diffusione di tecnologie basate sullo sfruttamento delle fonti rinnovabili, aleatorie e discontinue, che di dispositivi di conversione energetica ubicati presso utenze, quali quelle residenziali, caratterizzate da periodi di funzionamento non definibili a priori. Pertanto la scelta della soluzione impiantistica e della gestione integrata dei carichi potrà contribuire a contenere le perturbazioni sulle reti esterne e ad incentivare la produzione ed il consumo *"on-site"*. A titolo di esempio, in Figura 265 vengono riportate per un giorno tipo le curve disaggregate delle due utenze considerate nonché quella cumulata in un'ottica di *load sharing*.

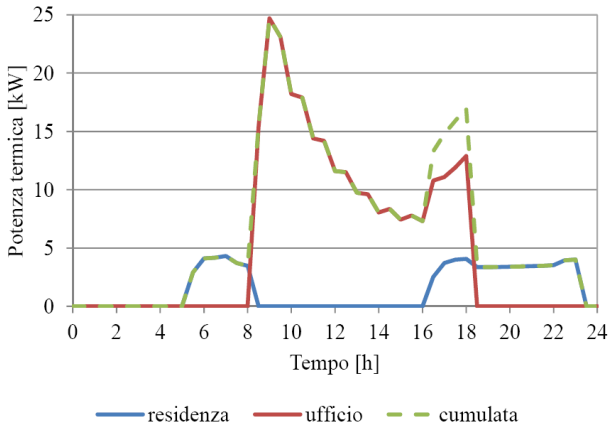


Figura 265. Carichi termici a Benevento, 19 febbraio

In Figura 266 si riporta il progetto completo sviluppato in ambiente TRNSYS con riferimento al funzionamento invernale. È stato utilizzato un passo di simulazione pari a 0,1 h.

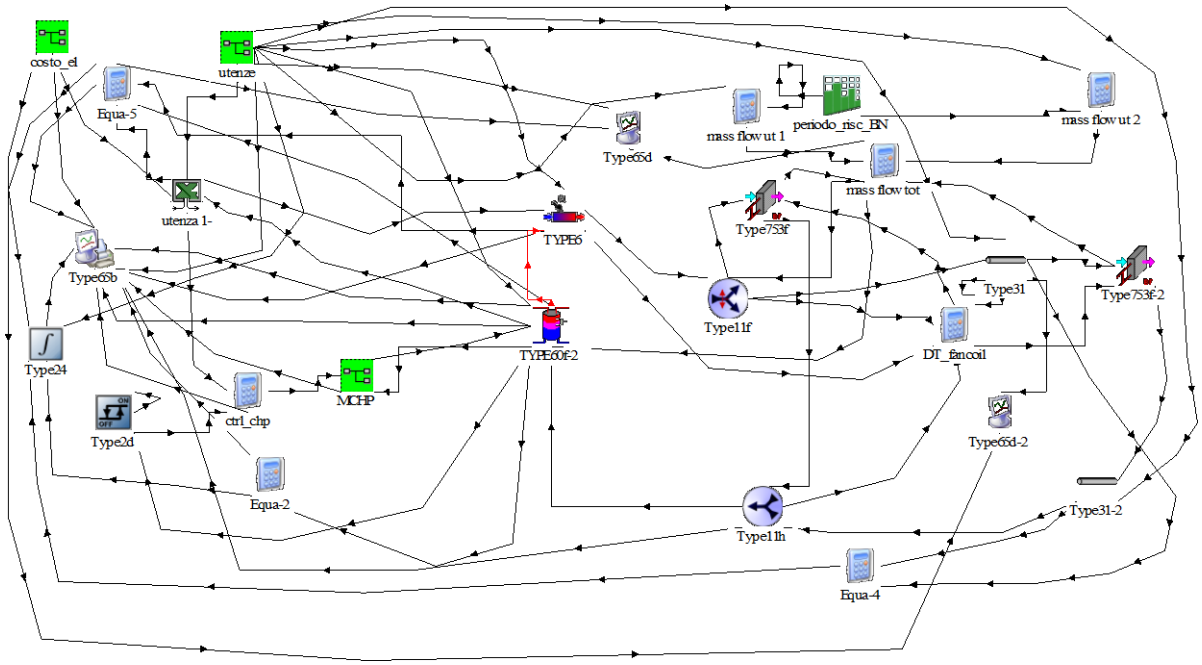


Figura 266. Schema TRNSYS dell'impianto di microcogenerazione con microrete termica

- *Descrizione degli algoritmi di controllo dei principali componenti e delle funzioni obiettivo per l'Ottimizzazione Termo_economica*

Si è proceduto all'analisi degli schemi più adatti al controllo dei principali componenti degli impianti sperimentali coinvolti nel progetto (cogeneratori, accumuli, dispositivi di integrazione, rete termica, rete elettrica, ecc.), nonché all'individuazione delle funzioni obiettivo finalizzate all'ottimizzazione energetica, economica e di impatto ambientale di impianti di cogenerazione e poligenerazione di piccola taglia.

In continuità con l'attività finalizzata al controllo ottimale di dispositivi di microcogenerazione integrati in edifici svolta nell'ambito delle attività promosse dall'International Energy Agency, nel progetto di ricerca *"Annex 42 FC+COGEN-SIM: The simulation of building-integrated fuel cell and other cogeneration systems"*, e per le finalità applicative del presente progetto si è fatto riferimento ad una funzione obiettivo e ad una modalità di gestione dell'impianto, di seguito esplicitata, che contemplasse aspetti:

- energetici e di impatto ambientale: di massimizzazione dei risparmi di energia primaria e delle emissioni evitate di anidride carbonica equivalente;
- tecnici: di riduzione dei cicli di ON-OFF del microcogeneratore;
- economici: di riduzione dei costi di esercizio.

La presenza di un sistema di accumulo termico, posto tra l'impianto cogenerativo e l'utenza, consente al MCHP di funzionare sempre a pieno carico e di utilizzare tutta l'energia termica da esso "prodotta". Da analisi sperimentali effettuate nell'ambito del precedente accordo di collaborazione tra ENEA e Università degli Studi del Sannio è emerso che il funzionamento a pieno carico mediante pilotaggio termico dell'impianto cogenerativo in esame comporta sempre dei vantaggi energetici ed ambientali rispetto al sistema tradizionale che prevede l'utilizzo di una caldaia alimentata a gas naturale, per soddisfare i fabbisogni termici, e della rete elettrica per il soddisfacimento del carico elettrico. Infatti è stato già verificato sperimentalmente che il nostro MCHP in condizioni di pieno carico (6,0 kW elettrici e 11,7 kW termici) garantisce REP di circa il 18% ed un ΔCO_2 di circa il 26% rispetto alla "produzione" separata dell'energia elettrica e termica. Da ciò scaturisce che l'ottimizzazione del funzionamento dell'impianto cogenerativo secondo criteri energetici o ambientali deriva dal semplice pilotaggio termico dell'impianto.

Va però precisato che il microcogeneratore presente nei due impianti sperimentali è stato progettato sia per il pilotaggio elettrico che per quello termico; a tal fine, a differenza di altre tipologie di MCHP presenti sul mercato, esso è dotato di uno scambiatore di calore interno, "radiatore", con finalità di protezione, in grado di dissipare

l'energia termica recuperata dal motore e non fornita all'utenza da riscaldare, evitando che la temperatura di ritorno raggiunga valori troppo elevati per garantire il corretto raffreddamento della camicia e della testata del motore. Evidentemente, il funzionamento del dissipatore interno determina una riduzione del rendimento termico effettivo della macchina rispetto a quello nominale, così come confermato da specifici test sperimentali condotti presso il laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi del Sannio e quindi una brusca riduzione del Coefficiente di Utilizzo del Combustibile (ottimizzazione energetica).

Inoltre, quando come nel caso in esame, il microcogeneratore scambia con dispositivi di accumulo caratterizzati da condizioni non ottimali di scambio termico con fluidi stagnanti, il raggiungimento di condizioni operative caratterizzate da una scarsa efficienza termica risulta particolarmente frequente. Bisogna pertanto definire una temperatura ottimale dell'acqua nella sezione dell'accumulo che interagisce energeticamente con lo scambiatore di calore collegato al microcogeneratore, al fine sia di evitare l'azionamento del radiatore che di assicurare elevati gradienti di temperatura per lo smaltimento dell'energia recuperata. Dopo un'accurata analisi sperimentale tale valore è stato fissato pari a 55 °C.

Infine è necessario assicurare una differenza tra la temperatura di accensione e di spegnimento del cogeneratore tale da ridurre il numero di avviamenti e le inefficienze ad esso legate (ottimizzazione tecnica). Una temperatura di accensione del MCHP troppo alta (prossima alla temperatura di spegnimento) crea problemi di pendolamento del MCHP con frequenti cicli di ON-OFF, mentre un valore di temperatura troppo basso riduce l'efficienza complessiva del sistema in quanto per evitare che la temperatura di mandata del fluido termovettore all'utenza si discosti molto dal valore di progetto è richiesto un maggiore intervento della caldaia di picco. La temperatura di spegnimento dell'impianto è stata fissata pari a 50 °C. Da un'analisi sperimentale è emerso che tale valore consente di evitare il pendolamento del MCHP e al tempo stesso non causa incrementi consistenti dell'energia termica fornita della caldaia di integrazione.

È sicuramente interessante individuare le condizioni ottimali di funzionamento del sistema con una funzione obiettivo di tipo economico, che però, nell'ipotesi considerata che l'impianto verrà gestito da una ESCo che sarà ovviamente interessata a massimizzare il proprio profitto, includa anche aspetti di risparmio di energia primaria nella remunerazione dei titoli di efficienza energetica conseguibili dal funzionamento efficiente dell'impianto.

In Figura 267 viene riportato lo schema di controllo implementato mediante il software di simulazione TRNSYS. E' possibile definire le informazioni in ingresso all'*Energy Management System* (EMS) che ha la funzione di azionare il sistema di cogenerazione e i dispositivi di integrazione attraverso le variabili di controllo del cogeneratore (x_{CHP}), della caldaia (x_c) e della rete di teleriscaldamento esterna (x_{TLR}), comprese nell'intervallo [0,1]. Mediante tali variabili, si definisce lo stato dei suddetti sistemi di generazione, in particolare lo stato "0" caratterizza la condizione di dispositivo inattivo, mentre lo stato "1" ne caratterizza il funzionamento a pieno carico; valori intermedi sono associati a condizioni di funzionamento a carico parziale.

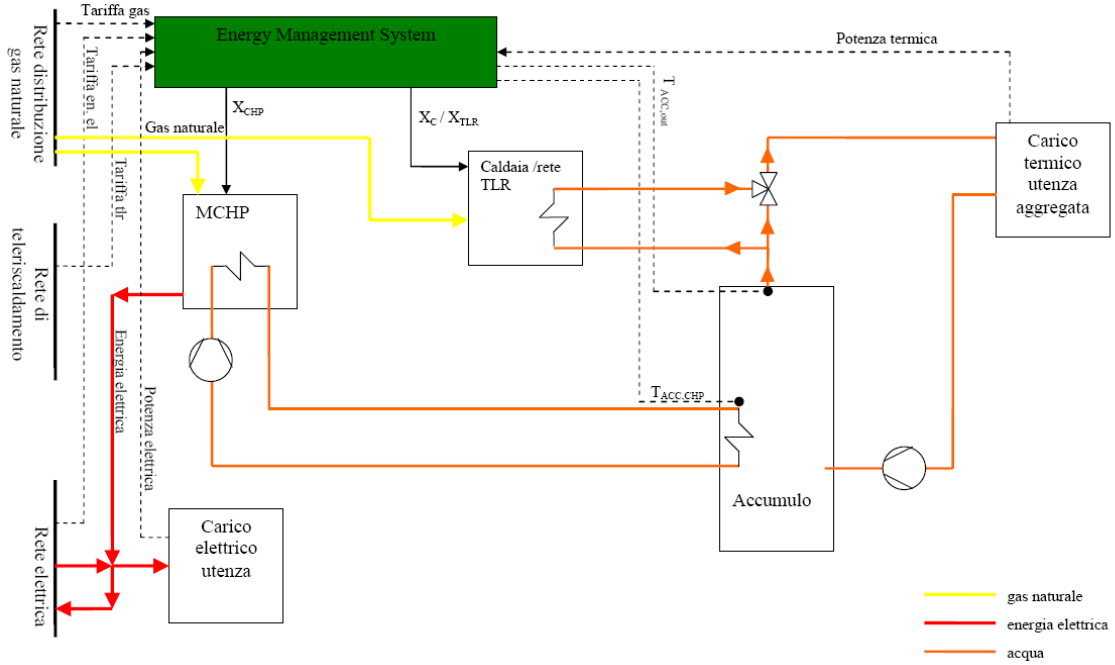


Figura 267. Schema di controllo dell'impianto sperimentale presso l'Università del Sannio

Dalla Figura 267 si evince che l'energia termica erogata dal microcogeneratore, basato su un motore a combustione interna alimentato a gas naturale, viene fornita al sistema di accumulo, mentre l'energia elettrica può essere utilizzata per coprire le richieste di energia elettrica delle utenze e/o può essere ceduta alla rete. Il sistema di integrazione, che può essere costituito da una caldaia alimentata a gas naturale o da una rete di teleriscaldamento, è posto a valle dell'accumulo termico in maniera tale da intervenire ogni qualvolta la temperatura in uscita dall'accumulo è inferiore a quella minima richiesta dalle utenze e cede al fluido termovettore una potenza termica tale da portare la temperatura di mandata al valore di progetto. In figura la cessione dell'energia termica ad una piccola rete di teleriscaldamento è rappresentata tramite un carico termico aggregato che è dato dalla somma del carico termico delle singole utenze e delle perdite associate alla microrete di teleriscaldamento.

- *Sviluppo della procedura di ottimizzazione*

Partendo dai modelli dei singoli componenti e dei sistemi impianto/microrete/utenza individuati si è proceduto alla simulazione di diverse condizione operative al fine di individuare attraverso l'ottimizzazione termoeconomica gli intervalli di funzionamento per un'intera annualità del sistema proposto e del sistema tradizionale.

Al termine della procedura di ottimizzazione vengono automaticamente generate, per ognuno dei casi presi in considerazione, le matrici che definiscono, ad intervalli temporali di 6 minuti, lo stato delle variabili di controllo degli attuatori presenti negli impianti sperimentali.

A titolo di esempio si riportano in Tabella 61 i risultati delle simulazioni con riferimento alle due collocazioni geografiche e considerando che la ESCo riesca ad ottenere delle riduzioni del costo di acquisto pari al 20% per il gas naturale e per l'energia elettrica rispetto a quelli del sistema tradizionale.

Tabella 61. Risultati delle simulazioni con riduzione del 20% del costo d'acquisto dell'energia elettrica e del gas naturale per la ESCo

	Benevento	**Milano**
h_funz_{MCHP} *[h]*	1943	2513
E_{th}^{rich} *[kWh]*	31110	41547
E_{th}^{CHP} *[kWh]*	22892	29604
E_{el}^{CHP} *[kWh]*	11310	14626
E_{p}^{CHP} *[kWh]*	40421	52272
E_{th}^{c} *[kWh]*	8218	11943
E_{p}^{c} *[kWh]*	9110	13241
E_{diss}^{serb} *[kWh]*	317	442
E_{diss}^{rete} *[kWh]*	1594	2392
E_{el}^{rich} *[kWh]*	5821	5206
E_{el}^{in} *[kWh]*	1220	1499
E_{el}^{out} *[kWh]*	6709	10920
REP [%]	**13,8**	**14,0**
ΔCO₂ [%]	**23,8**	**25,2**
Costi manutenzione [€]	136	176
TEE [-]	1,49	2,43
ΔCE [€]	**992**	**1184**
SPB [anni]	**9,07**	**7,60**

- *Validazione sperimentale*

I sistemi di poligenerazione preesistenti sono stati modificati introducendo nuovi componenti per le finalità e gli obietti di questa seconda annualità; in particolare in Figura 268 viene riportato un particolare del sistema per la simulazione del carico termico caratterizzati da un aerotermo e da dispositivi per la regolazione della potenza termica dissipabile.

Figura 268. Sistema di simulazione del carico termico

Al fine di validare il sistema completo sono state effettuate numerose prove sperimentali. Nella Figura 269 a titolo di esempio viene riportata la maschera relativa al diagramma di controllo del microcogeneratore. In funzione dei valori assunti dalla funzione obiettivo determinati dai costi unitari del sistema tradizionale (rosso) e del sistema proposto (verde), nonché dal valore della temperatura nell'accumulo (azzurro) si impone lo stato della variabile x_{CHP} (blu) che assume valore "1" (ON) o "0" (OFF).

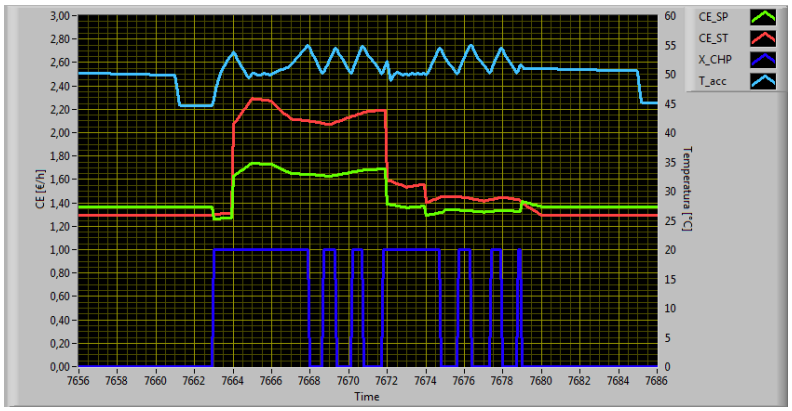


Figura 269. Maschera relativa al diagramma di controllo del funzionamento del microcogeneratore

- *Analisi dei risultati*

I risultati delle simulazioni e delle valutazioni sperimentali evidenziano che dispositivi di microcogenerazione collegati con microreti ad utenze diverse in modalità di *load sharing*, pur nel solo funzionamento invernale, permettono di assicurare elevati coefficienti di utilizzo di questi dispositivi ad elevata efficienza di conversione energetica anche in aree geografiche, quali quelle del Mediterraneo, caratterizzate da condizioni climatiche non sempre idonee alla cogenerazione. Tali fattori di utilizzo potrebbero essere ulteriormente incrementati attraverso una selezione più accurata delle utenze che condividono i carichi.

Nonostante i dispositivi in esame abbiano già dimostrato in quest'analisi potenzialità di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti, va sottolineato che non sono stati presi in considerazione né la produzione di acqua calda sanitaria, poco significativa per l'utenza primaria considerata (ufficio), né il funzionamento estivo, caratterizzato da costi di esercizio più onerosi rispetto al sistema tradizionale con riferimento alle soluzioni impiantistiche considerate e presenti presso i laboratori. Se quindi sia ampliando la tipologia di utenza considerata, per esempio introducendo alberghi o strutture ricreative, che immaginando una più vasta tipologia di soluzioni impiantistiche anche per la refrigerazione estiva, si prendessero in considerazione le ulteriori richieste di ACS e di refrigerazione estiva questi dispositivi potrebbero avere un maggior numero di ore di funzionamento annue e garantire più consistenti risparmi di energia primaria e di riduzione delle emissioni climalteranti rispetto alle simulazioni effettuate.

L'analisi di sensitività ha permesso di evidenziare come le prestazioni siano fortemente influenzate dai costi associati per sopperire alle perdite della rete e quindi dall'estensione a dal grado di coibentazione della stessa.

Infine si può affermare la considerevole dipendenza non solo delle variabili economiche, ma anche di quelle energetiche, influenzate dal coefficiente di utilizzo del microcogeneratore determinato da una funzione termoeconomica, dai costi unitari dell'energia elettrica e del gas naturale. Questi ultimi risultano non quantificabili in forma definitiva a priori, ma dettati da condizioni di mercato, e potrebbero essere positivamente condizionati dalla presenza di una ESCo, che in virtù dei grossi volumi trattati potrebbe accedere a tariffe più convenienti.

Infine, va rimarcato il ruolo primario che possono svolgere anche in questo caso opportuni strumenti di supporto che al fine di incrementare la diffusione di tali dispositivi a elevata efficienza di conversione imponessero condizioni economiche più vantaggiose di quanto non contemplato attraverso la remunerazione dei titoli di efficienza energetica.

L'analisi sperimentale condotta sia sui singoli componenti che sull'impianto opportunamente modificato per seguire i diagrammi di controllo generati dalla procedura di ottimizzazione termoeconomica, ha permesso di evidenziare un buon accordo fra i risultati delle simulazioni e quelli sperimentali.

Il lavoro svolto dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni dell'Università di Palermo, ha prodotto la definizione di un tool informatico per la modellazione del sottosistema elettrico di una piattaforma integrata che rappresenta il comportamento elettrico e termico del sistema di approvvigionamento energetico di un sistema multi-edificio [Report RdS/2012/080].

- *Definizione dei modelli*

Inizialmente sono stati studiati i modelli analitici a cui fare riferimento, le motivazioni delle scelte che li riguardano e l'inquadramento generale della problematica della caratterizzazione energetica integrata degli agglomerati di edifici.

La Figura 270 mostra l'architettura complessiva del sistema integrato, evidenziando ingressi ed uscite e mettendo in risalto la necessità di scambio di informazioni *run-time*. Tale esigenza esiste giacché alcune grandezze di controllo si adeguano ai profili di carico energetico (termico e/o elettrico) in ciascun intervallo di tempo elementare.

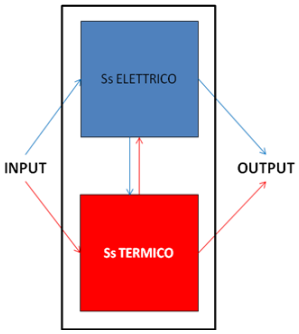


Figura 270. Schema a blocchi della piattaforma integrata

La Figura 271 mostra invece il sottosistema elettrico ed evidenzia la necessaria definizione di modelli e strategie. Il riquadro con sfondo più scuro si riferisce all'implementazione del 'tool' di simulazione del sottosistema elettrico oggetto del presente contratto. La rappresentazione grafica non vuole essere esaustiva, ma delinea la complessità dell'argomento ed i possibili sviluppi scientifici che da esso possono derivare. Il modello messo a punto potrà, infatti, essere l'elemento centrale per la valutazione di funzioni obiettivo e vincoli in problemi di gestione integrata delle risorse energetiche che la figura non mette in evidenza.

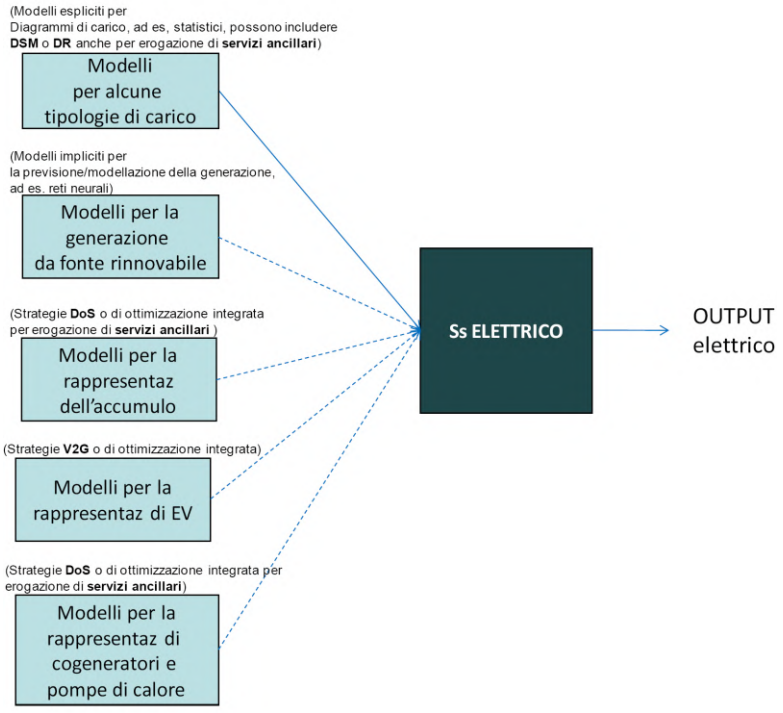


Figura 271. Schema a blocchi del sottosistema elettrico

Tale classe di problemi di gestione ottimizzata di tipo locale o integrata, che comprendono i sottosistemi elettrico e termico, potrà essere risolta con metodi di ottimizzazione di tipo deterministico o euristico in relazione alla tipologia di funzioni obiettivo, vincoli e variabili di ottimizzazione.

Focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche del sottosistema elettrico, si possono fornire le seguenti definizioni. Per strategie Distributed energy resources On Site, DoS, si intendono quelle azioni che mirano ad ottimizzare la produzione locale di energia elettrica. Per quanto riguarda il carico elettrico invece, le azioni di controllo vengono indicate con il termine Demand Side Management, DSM, quando esse mirano a ridurre i consumi energetici, con il termine Demand Response, DR, quando esse mirano a ridurre il picco del carico ed a modificare la forma del diagramma di carico in relazione a segnali di prezzo.

Gli ingressi controllabili delle fonti di energia o di alcuni sistemi che interagiscono ed espletano i propri effetti diretti o indiretti tanto sul sottosistema termico che sul sottosistema elettrico, infatti, come lo stato dei sistemi di accumulo o lo stato dei cogeneratori e delle pompe di calore, possono essere tanto oggetto di ottimizzazione integrata centralizzata che di strategie di tipo locale (DoS, DR o DSM), più circoscritte.

Occorre mettere, inoltre, in evidenza che la formulazione dei problemi di gestione ottimizzata è fortemente legata alla presenza di uno o più attori del mercato dell'energia. Nell'ottimizzazione, sia eseguita a livello locale che a livello centralizzato, infatti, gli obiettivi esprimono numericamente l'interesse di ciascuno.

Il gestore dei servizi di distribuzione elettrica (Distribution System Operator) ad esempio ha l'obiettivo di mantenere correttamente in esercizio il sistema potendo richiedere l'erogazione dei cosiddetti 'servizi ancillari' ad aggregati di carichi, generatori o sistemi di accumulo; a fronte di tale erogazione verrebbe corrisposto un compenso economico. I servizi ancillari si riferiscono quindi a servizi di rete di regolazione della frequenza o della tensione o ancora al servizio di 'load following'. Colui che possiede i sistemi di generazione, invece, ha interesse che i carichi si presentino con un profilo quanto più piatto possibile e dunque incentiva, attraverso adeguati sistemi di tariffazione (tariffa bioraria ad esempio), l'utilizzazione di apparecchiature elettriche nelle ore di basso carico (off-peak).

Qualora vi sia un unico attore proprietario di fonti di generazione, di carichi e della stessa rete di distribuzione (allacciamento con cabina privata), allora si potrà svolgere un'ottimizzazione integrata e centralizzata considerando come variabili di ottimizzazione tutti gli elementi controllabili. Gli obiettivi in questo caso potranno essere la minimizzazione delle perdite Joule, la riduzione delle emissioni e la massimizzazione del profitto rispettando determinate condizioni contrattuali al nodo di saldo.

- *Il mercato dell'energia ed i servizi ancillari resi da distretti energetici ed edifici a gestione energetica integrata*

Perché la filosofia di gestione integrata dei distretti energetici possa trovare largo impiego è cruciale la definizione degli incentivi economici per i proprietari degli impianti e per le società distributrici. Tali incentivi non potranno esistere finché non si creerà un mercato dei servizi che il distretto può offrire alla rete. Lo sviluppo di un tale mercato richiede certamente modifiche sostanziali all'attuale assetto regolatorio anche se la recente normativa CEI 0-21 fornisce interessanti spunti per la rappresentazione di azioni di controllo della potenza reattiva per la regolazione della tensione. E' interessante però sottolineare che le azioni di controllo che tipicamente offrono 'servizi ancillari', così come le azioni di controllo prefigurate dalla norma CEI 0-21, si espletano in un intervallo di tempo largamente inferiore ai 10-15 minuti tipicamente considerati per le simulazioni in regime permanente, oggetto del presente accordo di collaborazione. Fra i servizi ancillari che possono invece essere espletati in tempi di 10-15 minuti, si mette in evidenza il servizio di 'load following' o 'load levelling' che consistono nell'inseguimento o nel livellamento del carico elettrico. Esso si basa sulle previsioni del carico elettrico che possono essere fatti in ciascuna finestra temporale.

Ancora, considerando intervalli di tempo dell'ordine di 10-15 minuti è possibile anche immaginare azioni di controllo delle fonti di energia elettrica *che mantengano il sistema in condizioni operative di sicurezza*, ossia con un margine di energia sufficiente a garantire un intervento di una certa ampiezza a fronte di possibili improvvise variazioni del carico o ancora che garantiscano il funzionamento in punti di lavoro sufficientemente *robusti* alle variazioni del carico o della iniezione di potenza dalle sorgenti di generazione da fonte rinnovabile. Questi servizi possono avere effetti benefici sul mercato, provocando un contenimento dei prezzi. Il sistema di potenza del futuro comprenderà le risorse energetiche distribuite ed il mercato dei servizi ancillari. I prezzi per l'energia e per i servizi ancillari potrebbero cambiare su scala oraria o anche sub-oraria per riflettere la situazione corrente del sistema. Se il sistema dovesse entrare in condizioni di stress, i prezzi potrebbero salire consentendo di ristabilire condizioni operative di sicurezza.

In questo contesto, le microreti ed i distretti energetici potrebbero quindi supportare il mercato fornendo energia a basso costo. Esse potranno anche fornire servizi ancillari alla rete, rispondere ai segnali di prezzo oppure essere

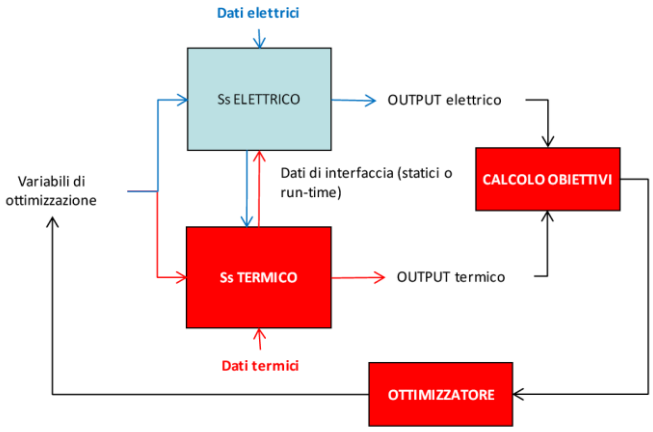


Figura 272. Ottimizzazione integrata delle risorse energetiche in un distretto energetico

protetti dalle variazioni dei prezzi da opportuni contratti bilaterali. Ciò che si potrà fare, grazie allo strumento di simulazione messo a punto è la ottimizzazione contestuale ed adattativa delle risorse energetiche che afferiscono ai due sottosistemi al fine di conseguire obiettivi legati ad alcuni servizi ancillari oltre che obiettivi generali di efficientamento energetico, contenimento dei consumi ed abbattimento delle emissioni. La Figura 272 mostra lo schema di ottimizzazione integrata.

Nel contesto in esame, la gestione delle risorse energetiche distribuite può quindi essere eseguita solamente su fonti di energia di tipo dispacciabile come cogeneratori, microturbine e sistemi di accumulo anche a servizio di veicoli elettrici (strategie V2G). Sulla base degli obiettivi che si vogliono conseguire e dei soggetti che espletano il controllo, come già detto, la gestione ottimale può avere obiettivi diversi.

Infine, si mette in evidenza che la valutazione delle transazioni economiche fra i vari soggetti afferenti al sistema di potenza può essere precisamente sviluppata solo se essa è supportata da uno strumento che consenta di analizzare la fisica del fenomeno della trasmissione dell'energia da un punto all'altro della rete. In questo contesto trova ampia giustificazione lo studio del tracciamento dei flussi di potenza.

- *Modelli alla base del tool di simulazione del SS elettrico*

Gli schemi elettrici che permettono di modellare le reti elettriche si differenziano a seconda del tipo di linea preso in considerazione e a seconda delle condizioni di funzionamento che si intende rappresentare. In particolare, nella presente sezione si farà riferimento al funzionamento dei sistemi elettrici in regime permanente e si farà riferimento a linee aeree, con conduttori nudi, e a linee in cavo tipicamente impiegate nelle reti di distribuzione. Sotto opportune ipotesi, valide per i sistemi di distribuzione, è possibile ricorrere ad un modello a parametri concentrati, determinabile direttamente a partire dalle costanti fondamentali e dalla lunghezza complessiva della linea, ottenuto concentrando i due soli rami derivati, uno all'inizio e uno alla fine della linea. il parallelo dei rami derivati, e considerando la serie delle induttanze e delle resistenze riferite alla lunghezza totale L_T della linea, Figura 273.

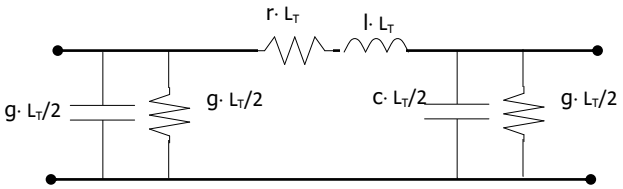


Figura 273. Circuito equivalente monofase di una linea corta

Se i livelli di tensione non sono elevati, i parametri trasversali possono essere trascurati e il modello a parametri concentrati si semplifica ulteriormente. La linea viene quindi rappresentata dalla sola impedenza serie $\dot{z} = (r + j\omega l)L_T$ (Figura 274). Questa approssimazione può facilmente essere adottata per linee aeree in bassa tensione, per le quali il valore della suscettanza capacitiva è molto piccolo, è può essere trascurato.

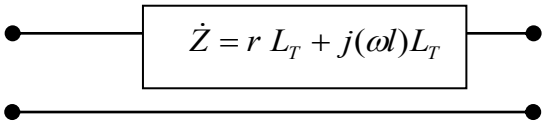


Figura 274. Circuito equivalente monofase di una linea aerea in bassa tensione

Per le linee in cavo in BT e per lunghezze inferiori al km la corrente capacitiva può essere trascurata. Poiché le cabine di distribuzione MT/BT hanno un raggio d'azione di qualche centinaio di metri, l'approssimazione fatta per la modellazione descritta in Figura 275 è valida per le linee BT. D'altra parte, nelle linee in MT e BT i fenomeni di conduzione trasversale sono trascurabili. Lo schema circuitale della linea trifase, per tratte di linea MT, cui si fa riferimento per la schematizzazione delle linee di distribuzione oggetto dello studio condotto nel presente Accordo di collaborazione, è rappresentato in figura.

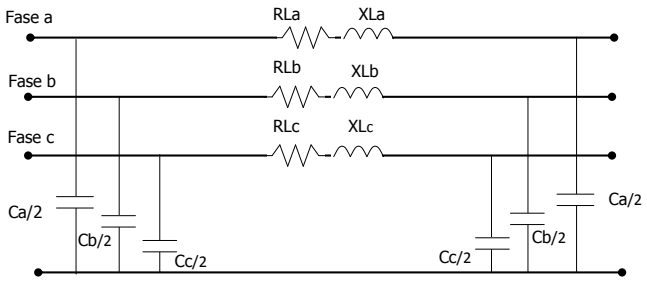


Figura 275. Modello circuitale equivalente a parametri concentrati di una linea aerea trifase in media tensione

Nella figura, sono rappresentate la resistenza $RL_{a,b,c}$, la reattanza longitudinale $XL_{a,b,c}$ e la capacità trasversale $C_{a,b,c}$ di ciascuna fase della linea, riferite alla lunghezza complessiva della linea.
Il modello si presta a rappresentare tanto le linee aeree quanto le linee in cavo, una volta definiti gli opportuni valori dei parametri di linea ivi rappresentati. Con la rappresentazione utilizzata, il problema dei flussi di potenza, e quindi la determinazione delle perdite per effetto Joule è stato risolto con il metodo di Newton Raphson.

- *Software di simulazione*

La realizzazione di un simulatore di comportamenti elettrici e termici in un'unica piattaforma software integrato è possibile se si stabilisce la loro modalità di interazione ed eventuali gerarchie nella elaborazione. L'esecuzione dei calcoli consentita dalla piattaforma messa a punto, nella corrente annualità, presso i laboratori ENEA e con la collaborazione con il DIAEE dell'Università di Roma "La Sapienza", prevede la risoluzione dei calcoli relativi ai due sottosistemi con un intervallo di tempo elementare di 15', nel quale si ritiene che le grandezze coinvolte nei processi non cambino valore. All'avvio della esecuzione, la interfaccia grafica di input richiede la immissione di dati di ingresso che servono a ciascuno dei due sottosistemi. Tali dati sono di stretta competenza dei due sottosistemi elettrico e termico oppure possono essere condivisi (dati di interfaccia).

Tali dati condivisi possono essere frutto di elaborazioni run-time e/o possono essere forniti dall'utente attraverso la interfaccia di input. Nella Figura 276 rappresentata la interazione fra i due sottosistemi.

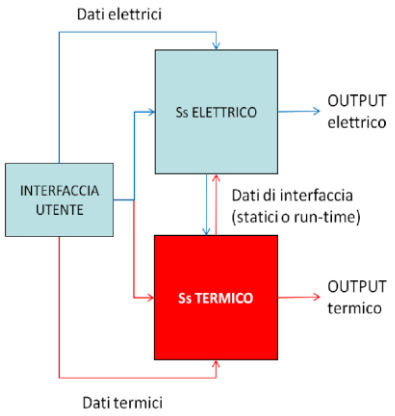


Figura 276. Interazione fra i SS elettrico e termico

Le frecce rosse indicano dati d'interesse per il sottosistema termico, mentre la freccia blu individua il percorso dei dati di interesse per il sottosistema elettrico. Il box 'interfaccia' rappresenta la interfaccia grafica di Input/Output; gli Output termico ed elettrico confluiranno quindi nella suddetta interfaccia. Nel caso di distretto energetico multi-edificio, si veda la Figura 277, dalle sbarre di BT del trasformatore MT/BT derivato dalla linea di MT si possono dipartire più linee di BT. Ciascuna delle linee può alimentare uno o più edifici anche attraverso derivazioni ed anche con magliature, anche se questa topologia di rete in BT è raramente utilizzata.

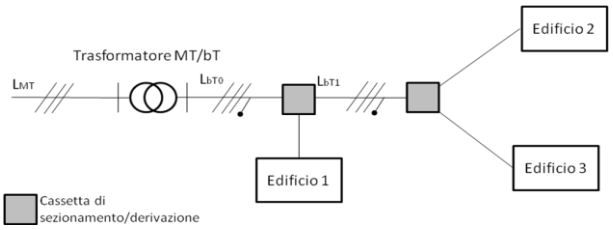


Figura 277. Rappresentazione unifilare del sistema che alimenta il distretto energetico nel caso di sistema multi-edificio

- *Descrizione del software che implementa il sottosistema elettrico*

Il software che implementa il sottosistema elettrico deve essenzialmente svolgere l'analisi di Load flow utilizzando il ben noto algoritmo di Newton Raphson. Il software delegato alla risoluzione del problema dell'analisi del LoadFlow è stato realizzato mediante un set di funzioni codificate in linguaggio MatLab. Data la natura prettamente numerica della procedura, la parametrizzazione del motore di calcolo è molto limitata e ridotta esclusivamente all'inserimento dei dati di interfaccia. Il cuore del sistema è quello che implementa il metodo di Newton-Raphson per la risoluzione del sistema di equazioni non lineari associato alla rete elettrica presa in considerazione. Tale metodo, di natura iterativa, consiste nel trovare, ad ogni passo di iterazione, un nuovo set di soluzioni del sistema a partire dal set ricavato al passo precedente, corretto utilizzando le informazioni sulle derivate delle funzioni considerate. Di seguito si riporta lo pseudo-codice dell'algoritmo:

1. generare un set iniziale di soluzioni (la scelta iniziale è quella di utilizzare 0 per gli sfasamenti ed 1 p.u. per le tensioni;
2. risolvere il bilancio delle potenze usando la stima corrente delle tensioni e degli sfasamenti;
3. linearizzare il sistema nell'intorno della stima corrente delle tensioni e degli sfasamenti (calcolo dello Jacobiano);
4. risolvere il sistema lineare associato per trovare il vettore delle correzioni;
5. aggiornare la stima delle tensioni e degli sfasamenti;
6. controllo della condizione di arresto, se raggiunta, termina, altrimenti torna al passo 2.

La condizione d'arresto dell'algoritmo consiste in un controllo la norma del vettore di correzione delle soluzioni verificando se questa è al di sotto di una soglia di tolleranza dell'errore. Le variabili da stimare in realtà possono essere diverse dalla tensione e dagli sfasamenti a seconda del tipo dei nodi considerati, ma le stesse considerazioni valgono, con la differenza che le funzioni da linearizzare dovranno essere esplicitate in modo diverso.

Integrazione in Simulink

Dato che la versione attuale del simulatore sviluppato presso i laboratori ENEA poggia sul software Simulink di Matlab, per l'integrazione del risolutore dell'analisi del load flow, è stato necessario incapsulare il pacchetto di funzioni all'interno di un blocco Simulink ad hoc. Per tale scopo è stata utilizzata un'istanza del blocco Simulink "*M-file*" (Figura 278).

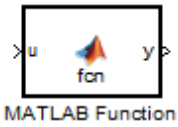


Figura 278. Esempio di istanza blocco *"M-file"*

l problema principale da affrontare in tale contesto è quello di scegliere un'interfaccia adeguata che mappi i pin di ingresso/uscita del modulo con i parametri di ingresso/uscita della funzione che risolve il load flow. Il passaggio da codice Matlab puro a blocco Simulink avviene al costo della perdita di flessibilità, in quanto l'interfaccia a pin di Simulink è statica, quindi è necessario prevedere *a priori* di quanti e quali ingressi/uscite è necessario disporre. Ciononostante, è possibile effettuare in un secondo tempo la riconversione del sistema ai propri bisogni in tempi molto ridotti, essendo necessario esclusivamente effettuare nuovamente il mapping fra il set di pin di ingressi/uscite con i parametri della funzione di risoluzione del load flow.

Interfaccia per la realizzazione di reti

Al fine di semplificare la creazione delle reti elettriche di cui effettuare la load flow analysis, è stato realizzato un sistema CAD (Computer Aided Drafting) per la progettazione grafica della stessa, mediante la diagrammazione dei nodi e delle connessioni degli elementi della rete, congiuntamente alla loro parametrizzazione.

Tramite questa interfaccia l'utente può, mediante semplici operazioni grafiche effettuate col mouse e l'inserimento di dati nelle proprietà degli oggetti, realizzare dei modelli validi da inserire nel sottosistema elettrico per eseguirne l'analisi di load flow. In Figura 279 è mostrata una schermata rappresentativa dell'interfaccia stessa.

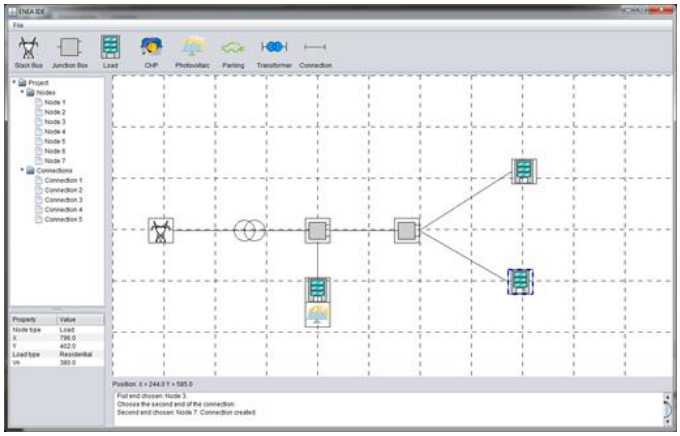


Figura 279 . Schermata del software di interfaccia per la creazione di modelli elettrici

- *Analisi dei risultati*

L'insieme di edifici a cui si fa riferimento ha una posizione spaziale in pianta (in termini di coordinate cartesiane rispetto ad un riferimento) ed una destinazione d'uso definite. La rete cui si farà riferimento per il test è una rete in bassa tensione (0,4 kV) alimentata da un trasformatore MT/BT da 250 kVA, le cui caratteristiche sono riassunte di seguito:

- An = 250 kVA; Vcc% = 6%; V_{1n}=20 kV; V_{2n}=0,4 kV; Pcc = 3800 W

Da questi dati possono desumersi i parametri longitudinali del trasformatore:

- Rt = 0,00978 Ω
- Xt = $(Zt^2 - Rt^2)^{0,5}$ = 0,03714 Ω

L'architettura di rete che si considera nelle applicazioni è quella rappresentata in Figura 242. Nella figura, PDC è il punto di consegna dell'energia. La lunghezza della linea MT, L_{MT} è nulla. Si immagina una simulazione annuale su 8760 ore con un intervallo di tempo elementare di 15 minuti. Si ipotizza che il cogeneratore abbia cosφ = 0,98 fisso. Il cogeneratore ha una potenza nominale pari a: P_{ele_maxCHP} = 101 kW. L'impianto fotovoltaico invece ha una potenza nominale pari a: P_{FV}=20 kW_p.

Il dimensionamento delle linee è stato eseguito seguendo il criterio termico e facendo una verifica sulla massima caduta di tensione impostata pari al 5%. Agli edifici corrisponde una destinazione d'uso di seguito indicata ed un valore di potenza di picco ricavata da diagrammi di carico reali forniti da ENEA:

- Edificio 1: Px1=70,34 kW cosφ=0,9 destinazione d'uso commerciale
- Edificio 2: Px2=10 kW cosφ=0,9 destinazione d'uso residenziale
- Edificio 3: Px3=10 kW cosφ=0,9 destinazione d'uso uffici.

Il carico rappresentato dall'edificio 3 è costituito da due grandi unità abitative alimentate da un unico punto di consegna in configurazione trifase. In Figura 280 è riportato l'andamento del diagramma di carico di una delle due unità abitative in una giornata invernale dell'edificio con destinazione residenziale, mentre in Figura 281 è riportato l'andamento del diagramma di carico di una giornata invernale dell'edificio con destinazione uffici.

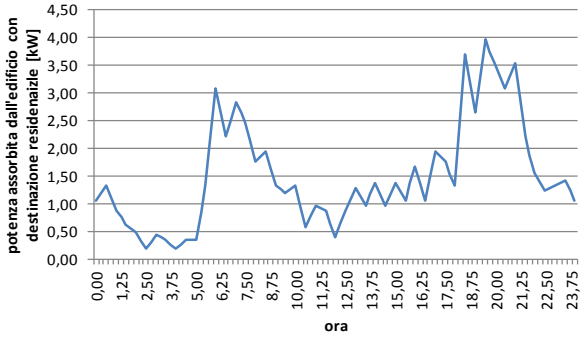


Figura 280. Andamento del profilo di assorbimento del carico residenziale in una giornata invernale (1 gennaio)

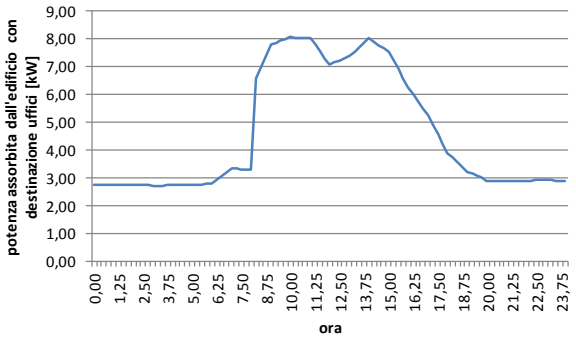


Figura 281. Andamento del profilo di assorbimento del carico uffici in una giornata invernale (1 gennaio)

I parametri elettrici delle linee sono riportati di seguito:

Tratto	Lunghezza, L [m]	Sezione, S [mm^2]	Resistenza, R [Ω/km]	Reattanza, X [Ω/km]
L_{bt0}	100	4	7,32	0,109
L_{bt1}	100	50	0,393	0,078
L_{bt2}	100	4	7,32	0,109
L_{bt3}	50	50	0,393	0,078

Nello scenario considerato, le simulazioni sono eseguite con il cogeneratore in funzione pronto ad intervenire 24 ore su 24 ed in presenza dell'apporto fotovoltaico. I generatori termici dei tre edifici sono spenti. I parametri elettrici delle linee sono riportati di seguito:

Tratto	Lunghezza, L [m]	Sezione, S [mm^2]	Resistenza, R [Ω/km]	Reattanza, X [Ω/km]
L_{bt0}	100	50	0,393	0,078
L_{bt1}	100	16	1,15	0,0817
L_{bt2}	100	4	7,32	0,109
L_{bt3}	50	4	7,32	0,109

Le simulazioni eseguite sull'intero anno forniscono i seguenti risultati:

Perdite Joule [kWh]	Massima caduta di tensione [%]
4,9593	0.0000051084

Per quanto riguarda gli andamenti nel tempo, le Figura 282 e 284 mostrano l'andamento delle perdite Joule in una giornata invernale ed in una giornata estiva. Come si nota l'accensione del cogeneratore durante la giornata invernale produce nelle stesse ore, rispetto alla giornata estiva, una riduzione delle perdite per effetto Joule provocando una inversione dei flussi di potenza che causa un innalzamento dei profili di tensione. La circostanza è confermata dal flusso di potenza attraverso il nodo di saldo che si inverte durante la giornata invernale. La Figura 284 e Figura 285 mostrano invece l'andamento della potenza attraverso il nodo di saldo in una giornata invernale ed estiva.

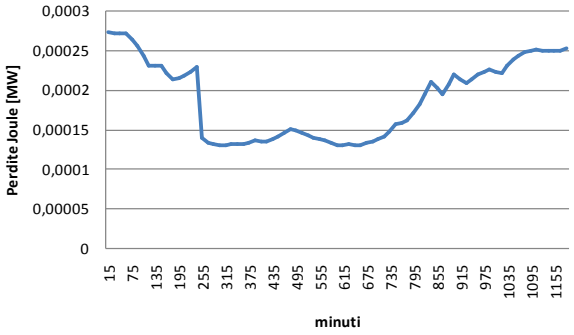


Figura 282. Andamento del profilo delle perdite Joule in una giornata invernale (1 gennaio)

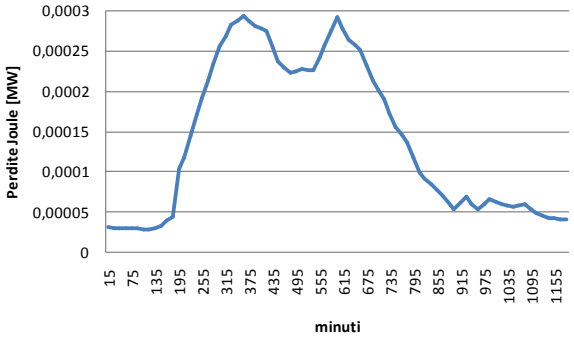


Figura 283. Andamento del profilo delle perdite Joule in una giornata estiva (1 agosto)

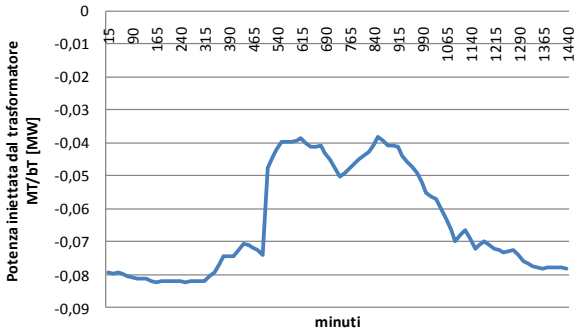


Figura 284. Andamento della potenza attraverso il nodo MT del trasformatore MT/BT in una giornata invernale (1 gennaio)

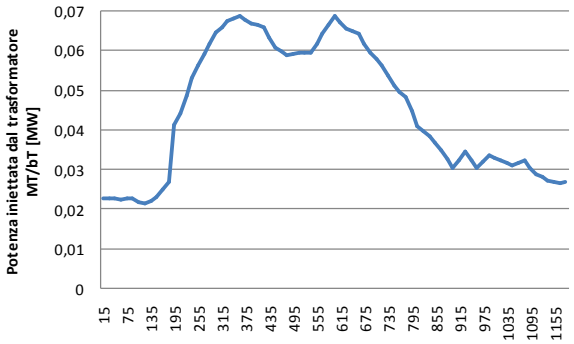


Figura 285. Andamento della potenza attraverso il nodo MT del trasformatore MT/BT in una giornata estiva (1 agosto)

La Figura 286 riporta il profilo della tensione in p.u. nel nodo 1 dove si ritiene si abbiano le massime cadute di tensione in una giornata estiva (1 agosto).

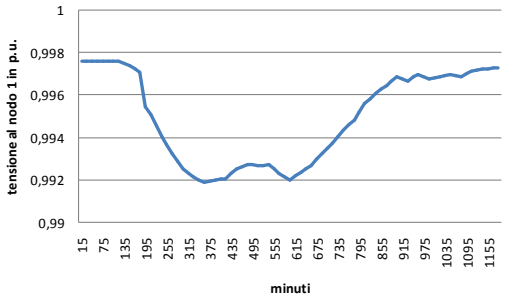


Figura 286. Profilo della tensione al nodo 1 in una giornata estiva (1 agosto)

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Nell'ambito del progetto sono state avviate collaborazioni con diverse Università e con la FIRE, le attività svolte sono state descritte nelle sezioni precedenti.

Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica (DENER)

Le attività svolte dal Dipartimento DENER, riferite all'obiettivo B, si sono concentrate sull'approfondimento di problematiche inerenti la generazione distribuita di piccolissima taglia (microcogenerazione), con focus in particolare sulle unità con potenza elettrica inferiore ai 10 kW [Report RdS/2012/076].

Università di Palermo, Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali (DREAM)

Le attività svolte dal Dipartimento DREAM, riferite all'obiettivo D, si sono concentrate sul tema della climatizzazione dei centri di calcolo. Infatti, i costi degli impianti di raffreddamento sono una quota importante dei costi di gestione che la imprese operanti nell'ambito delle telecomunicazioni devono sostenere [Report RdS/2012/

Università del Sannio, Dipartimento di Ingegneria

Il contributo del Dipartimento di Ingegneria, riferito all'obiettivo D, si è concentrato nello sviluppo e nella validazione sperimentale di algoritmi per la gestione remota ottimizzata di dispositivi di microcogenerazione e micropoligenerazione, per applicazioni distribuite in utenze residenziali e del piccolo terziario, allacciate a reti termiche [Report RdS/2012/081].

Università di Palermo – Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni (DIEET)

Il lavoro svolto, riferito all'obiettivo *D,* ha prodotto la definizione di un tool informatico per la modellazione del sottosistema elettrico di una piattaforma integrata che rappresenta il comportamento elettrico e termico del sistema di approvvigionamento energetico di un sistema multi-edificio [Report RdS/2012/080].

Università di Roma "La Sapienza", Centro interdisciplinare territorio edilizia restauro ambiente (CITERA)

Le attività svolte dal centro CITERA, riferite all'obiettivo C hanno avuto come obiettivo caratterizzazione energetica di un sistema ibrido rappresentativo di una micro–grid di prova per la valutazione delle funzionalità e potenzialità di software dedicati per la gestione energetica ed il controllo di una Smart Grid (aspetti elettrici e termici) [Report RdS/2012/082].

Università di Roma "La Sapienza" – Dip. di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE)

L'attività svolta dal Dipartimento DIAEE – Sezione Ingegneria Elettrica, riferite all'obiettivo C, è stata finalizzata allo sviluppo di modelli, che simulano il comportamento energetico di una rete termica per usi civili, allo scopo di integrarli in una piattaforma complessa in grado di simulare il comportamento termico di una rete energetica distribuita [Report RdS/2012/079].

Federazione Italiana Risparmio Energetico – FIRE

Oggetto del contributo della FIRE, riferite all'obiettivo *B*, è stata l'analisi del marcato della microcogenerazione con riferimento a dimensionamento, performance e gestione [Report RdS/2012/083].

Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici

Il prodotto dell'attività è un insieme di proposte, logiche e fisiche, mirate ad aumentare l'efficienza energetica nella pubblica illuminazione, intesa in senso lato, cioè comprendendo situazioni di illuminazione di ambienti pubblici non solo in esterni.

In ottica "smart", l'infrastruttura del sistema di illuminazione a sua volta viene utilizzata come struttura portante di una rete di sensori, di sistemi di comunicazione e di applicazioni intelligenti il cui scopo è quello di rendere più efficiente dal punto di vista energetico e funzionale la gestione di reti urbane connesse a servizi energetici pubblici: per questo il prodotto è lo sviluppo di una serie di tecnologie ICT (compresi sensori, rete di trasporto dati, sistemi intelligenti di regolazione, ecc. in una unica piattaforma informativa) per un approccio adattivo dell'illuminazione (Energy on demand) con tele gestione, monitoraggio del traffico e aperta ad altri sviluppi. Il vantaggio è una riduzione dei costi rispetto ad approcci parziali e anche un minor costo per la rete infrastrutturale, che viene condivisa da più applicazioni, elemento importante per la "smart city".

L'attività di ricerca è più efficace se evidenziata da installazioni sperimentali o dimostrative, con una forte comunicazione e trasferimento tecnologico verso gli operatori del settore, le pubbliche amministrazioni e gli utenti finali. Pertanto anche questo aspetto viene opportunamente valorizzato nel progetto.

L'efficienza energetica di un qualunque dispositivo, illuminazione compresa, è legata all'efficacia del dispositivo stesso, ovvero alla sua capacità di ottenere i risultati voluti.

E' necessario quindi svolgere attività di ricerca, sia teorica che sperimentale, sui singoli elementi che compongono la "catena illuminotecnica": sorgenti di luce, apparecchi di illuminazione, parametri illuminotecnici critici, tipi di impianto, caratteristiche del manto stradale, parzializzazione del flusso luminoso in relazione alle condizioni locali, ecc..

In parallelo è necessario studiare, per minimizzare, gli effetti negativi dell'illuminazione artificiale: tipicamente il flusso disperso verso l'alto negli impianti in esterno, che va a comporre quello che comunemente si chiama "inquinamento luminoso". L'illuminazione artificiale notturna ha anche un impatto ambientale sull'ambiente naturale e urbano ed è importante cercare un primo approccio per scegliere, tra differenti alternative di attuazione di un progetto, quelle a minore impatto ambientale possibile.

E' altrettanto importante svolgere attività di ricerca sull'interazione della luce artificiale con l'uomo, principale utilizzatore della stessa, in quanto all'evolversi della tecnologia alcune assunzioni finora utilizzate per quantificare parametri illuminotecnici stanno diventando insufficienti. Tipico è il caso del color rendering index (CRI), pensato per misurare quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa. I nuovi sistemi di illuminazione, basati su LED, possono avere un CRI basso, ma un piacevole aspetto visivo (visual appeal) ed una buona preservazione della sensazione di colore. E' importante anche collegare l'indice di resa cromatica con il contrasto locale percepito in una reale condizione di utilizzo dell'illuminante, oppure studiare la curva di sensibilità dell'occhio (Vlambda), che collega le grandezze fotometriche a quelle radiometriche in funzione delle nuove sorgenti luminose. Questi problemi sono di grande importanza non solo per l'architettura o il design, ma anche per l'ergonomia e in definitiva per l'efficienza energetica.

l documento SEC(2009) 1295 della Commissione Europea (la Technology rodmap per il SET PLAN) dichiara che per raggiungere nel 2020 una riduzione delle emissioni di gas serra del 40 attraverso l'uso sostenibile e la produzione di energia è necessario adottare approcci sistemici ed innovazione organizzativa che includono efficienza energetica, tecnologie "low carbon" e gestione "smart" della produzione e della domanda di energia, in particolare misure su edifici, reti energetiche locali e trasporti dovrebbero essere i componenti principali delle iniziative. La tematica "smart city" è presentata come una delle sette misure prioritarie per affrontare la problematica energetico-ambientale, terza misura in termini di consistenza dell'investimento europeo. Per l'attuazione del SET PLAN sono partite a livello europeo due importanti iniziative, la "Smart City European Industrial Initiative" ed il Joint Program su "Smart City" della EERA (European Energy Research Alliance). ENEA coordina le attività di EERA ed ha un ruolo significativo nel gruppo sulle Smart City dove coordina la rete italiana ed una delle quattro aree in cui sono organizzate le attività europee (urban network integration).

A livello internazionale l'attenzione sul tema Smart Cities è crescente, dimostrato anche da progetti pilota di varia natura. In Italia esistono esperienze separate nei vari settori citati (illuminazione ad alta efficienza, mobilità sostenibile, edifici a controllo remoto) ma non esiste un progetto che mira allo sviluppo di una piattaforma integrata che permetta di condividere le informazioni sensoristiche raccolte tramite il sistema di illuminazione pubblica ed utilizzarle in modo trasversale secondo un approccio adattivo.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Il progetto si sviluppa su più linee di attività:

- ricerca sull'interazione della luce con l'uomo e con l'ambiente;
- ricerca su materiali per dispositivi a OLED e LED;
- sviluppo di sistemi innovativi di smart lighting;
- sviluppo di un sistema di gestione di una rete di edifici integrata con il sistema di illuminazione pubblica;
- sviluppo di una sperimentazione dimostrativa di "Smart Village" e metodi di progettazione;
- partecipazione ai network nazionali e internazionali;
- sperimentazione territoriale ed assessment dei prodotti del Network Lumiere.

Il progetto parte dai risultati raggiunti nel PAR 2008-2009 e nel PAR 2010 (progetti 3.2 e 3.2.1). Di questi, si riportano qui i principali elementi che hanno maggiore nesso con le attività svolte nell'annualità oggetto del presente documento.

- E' stato progettato un elemento illuminante modulare a LED per illuminazione pubblica, chiamato PLUS, per quanto riguarda la parte ottica e di design, ne sono stati realizzati 2 prototipi (con ottica e dissipatore diversi) ed è stato sviluppato un progetto funzionale di un sistema integrato con sensori di altra natura.
- Sono stati realizzati test percettivi per la valutazione di differenti indici di resa cromatica e per la valutazione del contrasto di immagini digitali ed è stato realizzato un tool software per tali valutazioni.
- E' stata studiata la possibilità di integrazione di smart sensor che includono sistemi di visione per il monitoraggio della domanda di illuminazione e sistemi di comunicazione direttamente sul corpo del lampione creando la possibilità di una rete di pali intelligenti .
- La struttura prototipale di un impianto di smart lighting è stato realizzata presso il Centro Ricerche della Casaccia dell'ENEA dove tutto il fronte di illuminazione delle torri faro (circa 24 kW) è controllato in modo adattivo sulla base della ricostruzione della domanda (passaggi di veicoli e persone).
- Sullo stesso centro è stata effettuata anche una realizzazione di uno smart building e sviluppata una modellistica per la diagnostica estesa al concetto di rete. Per supportare tali applicazioni è stata sviluppata una piattaforma software diretta verso la "smart town" in grado di raccogliere contemporaneamente dati ed inviare controlli su tre diversi settori applicativi integrati sulla stessa rete della IP: gestione della illuminazione pubblica, gestione di veicoli elettrici e gestione di una rete di edifici. La piattaforma include l'acquisizione dei dati, la organizzazione dei database, lo sviluppo dei modelli di diagnostica e lo sviluppo dei modelli di regolazione ottimale.
- E' iniziata una importante funzione di ENEA di rappresentante italiano nel Gruppo EERA smart city, creando un network italiano e coordinando una delle quattro aree di riferimento del gruppo EERA SC, quella che si riferisce in particolare alle integrazione delle funzionalità smart nella illuminazione pubblica.
- E' continuata la partecipazione ENEA alle attività normative e legislative in Italia (UNI e CEI), in Europa (per le Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica) e a livello mondiale (CIE).
- E' stato consolidato lo sviluppo del Network Lumiere: quattro pool operativi, costituiti da soggetti pubblici e privati, hanno collaborato per promuovere l'efficienza energetica nell'illuminazione pubblica (Network dei Comuni, Network delle Esco, Produttori delle tecnologie, Promotori della Sostenibilità). Sono state elaborate le Linee Guida Economico-Finanziarie per la realizzazione d'interventi di riqualificazione energetica degli impianti d'illuminazione pubblica. E' stato elaborato un Modello sperimentale di audit energetico degli impianti. Sono stati realizzati audit energetici gratuiti su presso Comuni aderenti al Network e sono stati organizzati Workshop di trasferimento dei risultati del Progetto ai Comuni.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Ricerca sull'interazione della luce con l'uomo e con l'ambiente

L'obiettivo A è dedicato a ricerca sulla quantificazione di aspetti legati all'interazione luce-uomo, inclusi aspetti circadiani. Questo è una base per approfondire limiti ed opportunità delle nuove tecnologie (LED, OLED, uso del colore).

Esperimenti sulla resa cromatica

L'attività è stata svolta nell'ambito della collaborazione con Università di Milano, Dipartimento di informatica [Report RDS/2012/272].

Parlando in termini di luce bianca, la tonalità di bianco di una sorgente di illuminazione viene descritta dalla temperatura di colore correlata (CCT). Sorgenti di luce con spettri differenti possono avere la stessa CCT (chiaramente non può accadere l'inverso), di conseguenza campioni di colori osservati sotto sorgenti di luce con la stessa CCT possono apparire differenti. Da qui la necessità di un metodo per valutare la bontà di un certo illuminante.

Il color rendering index (CRI) è stato pensato per misurare quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa. Negli ultimi anni il CRI, o meglio il metodo per valutare la bontà di una certa illuminante, è tornato materia di studio, in quanto i nuovi sistemi di illuminazione possono avere una piacevole resa cromatica ma un indice CRI piuttosto basso. Il calcolo del CRI si basa unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce, ma non tiene conto di fattori spaziali, essenziali per determinare la resa visiva di una scena. Infine, problema del CRI è il tentativo di esprimere in un solo numero tutte le caratteristiche della sorgente di luce in esame. Nel mondo reale la luce è diffusa o diretta, con le eventuali sfumature in mezzo. Questo dà luogo alla formazione di ombre che possono essere più o meno morbide: ciò è fondamentale per la percezione del contrasto di una scena. Due sorgenti luminose con la stessa distribuzione spettrale, ma differente distribuzione spaziale rendono due scene in maniera differente, in cui la relazione tra gli oggetti della scena crea effetti di contrasto diversi.

Il CRI è definito dalla CIE come ''Effect of an illuminant on the color appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their color appearance under a reference illuminant.'' La misura del CRI implica dunque un illuminante di riferimento, legato alla nostra concezione di luce a noi familiare, e un "campionario" di colori, discreti, su superficie piana.

Come detto sopra, si è visto che tale indice non è adatto a stimare la resa visiva tipica di sorgenti luminose a banda stretta, come ad esempio alcuni tipi di lampade fluorescenti o di led bianchi. Questo proprio perché il metodo si basa su campioni di colore discreti e quindi, se la sorgente emette prevalentemente in lunghezze d'onda che non 'coprono' i colori campione anche se con spostamenti molto piccoli, queste lunghezze d'onda non danno alcun contributo per la valutazione della resa cromatica.

Ci sono diverse proposte alternative[22], alcune delle quali sono modifiche o miglioramenti dell'indice base, altre invece si basano su approcci totalmente diversi.

Il contrasto è l'essenza della percezione visiva. Infatti, quello che il nostro sistema visivo percepisce è la differenza di luminosità e di colore della scena che osserva, cioè il contrasto.

Misurare il contrasto risulta una parte importante nella valutazione di una sorgente luminosa. Una sorgente luminosa buona non solo garantisce il più possibile la resa cromatica degli oggetti ma garantisce anche un contrasto adeguato ad una visione confortevole: questo ci riporta ancora a uno dei problemi principali del CRI, che cerca di stimare la bontà della luce calcolando un unico indice, cosa che a sua volta non può tener conto di tutti i fattori che rendono una sorgente di luce visivamente piacevole.
Il problema è che il concetto di contrasto sfugge la sua definizione. Ci sono diverse definizioni di contrasto a seconda del contesto di utilizzo, ma nessuna è universalmente riconosciuta come misura del contrasto percepito. La maggior parte delle misure psicofisiche svolte finora è stata condotta in condizioni di stimolo isolato dal

[22] Ricordiamo Color Quality Scale (CQS), Metodo CRI R96a, Metodo CRI00, Color Harmony Index, Approccio di Smet basato su oggetti/sulla memoria, Metodo di Da Pos, Indice di resa cromatica basato sui nomi categorici dei colori, Indice di resa cromatica CRI-CAM02 UCS, Gamut Area Index, Metodo di Oleari, Rank order Color Rendering Index (RCRI), Metodo di Monte Carlo, Metodo di Hashimoto. Questi metodi sono descritti nel Report tecnico di riferimento

contesto. Questo è stato spesso necessario a causa della notevole complessità del Sistema Visivo Umano ed anche in alcuni casi per le caratteristiche degli strumenti a disposizione.

Il tema del contrasto è stato affrontato da vari autori, all'inizio in modo estremamente semplificato e via via aggiungendo complessità e cercando di legare il più possibile la misura al contesto d'uso. A partire dalle prime misure di contrasto globale si è giunti a misure locali molto più vicine alla nostra percezione. Si pensi alla caratterizzazione della luminosità di un ambiente; in tale ambiente vi saranno zone più e meno illuminate. Una misura di contrasto globale si basa su un qualche rapporto tra il punto a luminosità maggiore e quello a luminosità minore. Tuttavia, in questo modo, non si riesce a prendere in considerazione la distribuzione spaziale della luminanza che è la cosa più interessante da analizzare.

La prima formula di contrasto, ancora oggi una delle più note e molto diffusa, è datata 1927, e riguarda il contrasto globale. Solo a partire dagli anni 90 cominciano a essere studiate efficaci misure del contrasto percepito nel contesto[23].

E' stato dunque svolto da ENEA e collaboratori, nella primavera 2012, un esperimento sulla resa visiva di sorgenti di luce. Esso ha coinvolto 96 studenti di quattro classi (3° geometri, 1° B liceo scientifico, 2° B liceo scientifico, 3° D liceo scientifico) della scuola secondaria ISIS "Edith Stein" di Gavirate (VA). Scopo della ricerca è stato esaminare come sorgenti di luce di tipo differente avessero una diversa resa visiva dei colori degli oggetti.

La campagna sperimentale si è svolta presso la scuola stessa, che ha messo a disposizione uno dei suoi laboratori per attrezzarlo in modo opportuno. Il "progetto luce" è quindi stato attuato in 3 fasi:

- una lezione iniziale, nelle varie classi coinvolte, in cui si sono spiegati (mirando soprattutto ai contenuti, non alle formule) alcuni concetti base dell'illuminotecnica (flusso luminoso, intensità luminosa, illuminamento, luminanza, temperatura di colore), per introdurre un tema che non fa parte del programma scolastico, interessando gli studenti ma senza entrare in approfondimenti tali da "influenzare" lo svolgimento degli esperimenti successivi. Si è quindi parlato dell'efficienza energetica legata all'illuminazione, di etichettatura energetica e (molto in generale) di ecodesign, e si sono messe verificate le conoscenze appena acquisite con un semplice test: identificare flusso, potenza, presenza di mercurio… sull'imballo di alcune lampade e poi valutare ad esempio l'efficienza della lampada;
- l'attività sperimentale in laboratorio, sulla resa visiva. Dopo i test, gli studenti hanno provato a usare strumentazione portatile per misurare illuminamenti e coordinate cromatiche e ricavare CCT di sorgenti;
- una presentazione finale dei risultati dell'attività sperimentale.

L'esperimento riproduce in parte il metodo usato per il calcolo del CRI[24]. Il confronto non viene fatto in termini matematici ma da osservatori umani. L'interesse per questo esperimento non è solo per il gran numero di osservatori coinvolti, ma anche per lo studio effettuato su una scena a tre dimensioni, piuttosto che solamente bidimensionale. Costruire una scena 3D comporta introdurre ombre e inter-riflessioni, che si creano a causa delle geometrie coinvolte, in modo da rispecchiare quello che succede nella realtà.

Gli esperimenti svolti sono quindi due: nel primo vengono calcolate le differenze tra patch corrispondenti di 2 Macbeth Color Checker osservati sotto una luce di riferimento e una luce test. Il secondo esperimento implica l'utilizzo di oggetti tridimensionali colorati identici, ottenuti con 4 costruzioni ("transformers", in gergo) LEGO™ identiche. In questo caso sono state calcolate le differenze di colore di 6 mattoncini colorati sul transformer.

Sono stati costruiti 4 box di legno di dimensione 1m x 1m x 0,8m, con interno bianco opaco e uno schermo frontale per impedire alla luce di colpire direttamente gli occhi degli osservatori, e disposti in un locale con un livello di illuminazione molto basso. Nei box sono state posizionate le sorgenti (6 lampade di cui 2 a LED, 1 ad alogeni e 3 fluorescenti compatte integrate, più la lampada di riferimento ad alogeni) e i campioni da osservare (Macbeth Color Checker o transformers).

Il Macbeth Color Checker e le riflettanze delle 24 patch, misurate con spettrofotometro Konica Minolta CM 2600d sono riportate in Figura 287.

[23] A livello di contrasto globale ricordiamo le definizioni di Milchelson. King-Smith and Kulikowski, Burkhardt, Whittle. Per il contrasto percepito nel contesto ricordiamo ad i metodi di Peli, Boccignone, Ahumada, Tadmor e Tolhurst, Reinagel e Zador, Rizzi et al. (RAMM), Simone et al. dettagli nel Report tecnico di riferimento

[24] Ricordiamo che per il CRI si calcolano le differenze visive di due patch identiche osservate sotto illuminanti diverse. Il procedimento è ripetuto per un certo numero di patch ed infine viene calcolata una media, cioè il CRI

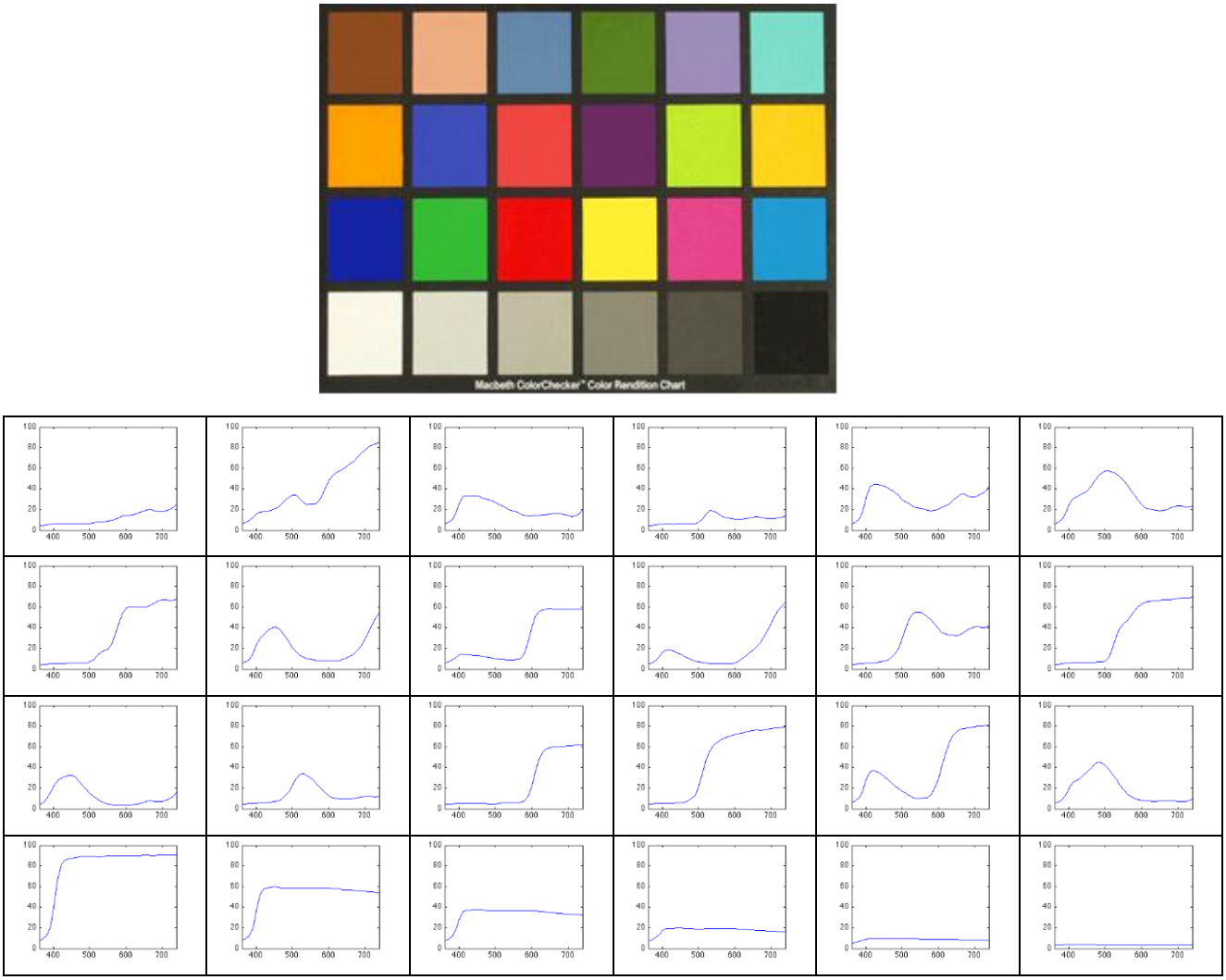


Figura 287. Il Macbeth Color Checker e le riflettanze delle patches

Nella Tabella 62 si riportano le caratteristiche delle sorgenti usate nei test.

Tabella 62. Elenco e descrizione delle lampade usate durante l'esperimento

Id lampada	B1S1	B2S1	B3S1	Rif.	B1S2	B2S2	B3S3
Potenza (W)	20	11	11	42	8	3	30
Flusso (lm)	1250	650	600	630	345	270	806
CCT	2700	6400	4000	2500-2700	3000	2700	2700-3000
Tipo	Fluo. compatta (CFL-i)	Fluo. Compatta (CFL-i)	Fluo. Compatta (CFL-i)	Alogena	LED	LED	Alogena IRC
Classe	A	A	A	C	A	A	B
Esperimento	LEGO ™	MCC+ LEGO ™	LEGO ™	MCC+ LEGO™	LEGO™	MCC+LEGO™	LEGO ™

In Figura 288 sono mostrati i grafici spettrali normalizzati relativi alle 7 sorgenti di luce, misurati con uno spettroradiometro Konica Minolta CS-2000A.

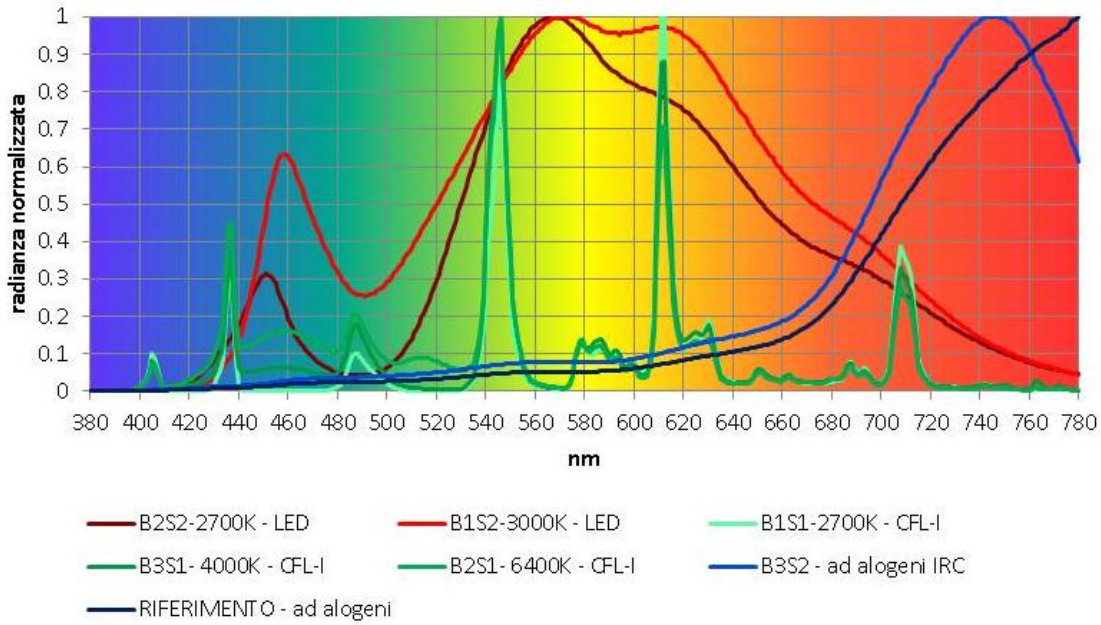


Figura 288. Radianza normalizzata delle lampade usate negli esperimenti

Per i test con Macbeth Color Checker sono state usate le sorgenti B2S1 (fluorescente compatta) e B2S2 (a LED). Si noti che le CCT non sono sempre simili a quella di riferimento, per cui il calcolo del CRI quindi non avrebbe molto senso, in quanto è ben specificato nell'algoritmo che le lampade devono avere una CCT confrontabile. Si è scelto di valutare comunque i risultati dell'esperimento anche in questo caso, poiché grazie al meccanismo di costanza cromatica, il sistema visivo umano è in grado in qualche modo di minimizzare gli effetti di questa differenza di colore della luce.

Per il secondo esperimento sono state usate tutte le sorgenti. Gli osservatori dovevano osservare 6 specifici mattoncini colorati (arancione, verde, bianco, blu, giallo, rosso) dei transformers.

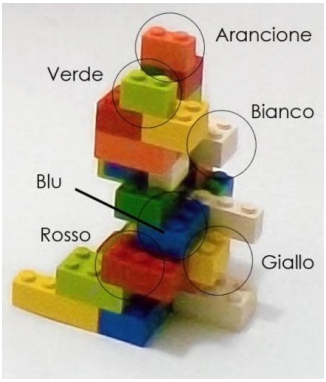


Figura 289. Il transformer per il secondo esperimento. I cerchi indicano i mattoncini presi in considerazione per l'osservazione

Di seguito il grafico di riflettenza dei 6 mattoncini LEGO™ misurati con lo spettrofotometro Konica Minolta CM 2600d.

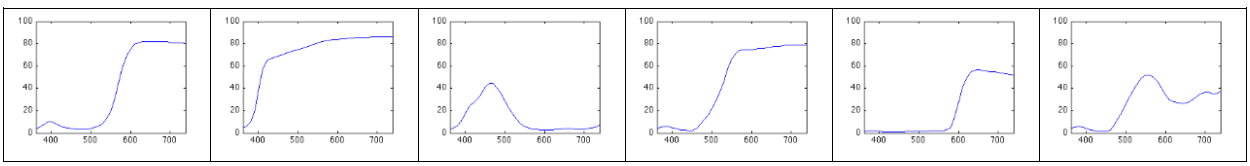


Figura 290. Spettri di riflettanza del transformer: arancione, bianco, blu, giallo, rosso, verde

Per quantificare il grado di conservazione del colore percepito dagli osservatori è stato usato un questionario. Il questionario richiedeva:

- dati personali (Iniziali di nome e cognome, sesso, età, colore degli occhi, classe frequentata, eventuali problemi di vista, e uso di lenti o occhiali durante l'esperimento)
- valutazione delle differenze per ogni coppia di colori, secondo la seguente scala:

Patch (sotto sorgente-test e sorgente-riferimento)	*valutazione*	*punteggio*
sono identiche	**ID**	100
hanno una differenza appena percettibile	**DAP**	80-99
sono differenti	**DIF**	50-79
sono molto differenti	**MD**	1-49
sono completamente diverse	**CD**	0

In realtà gli osservatori - che, ricordiamo, sono studenti - hanno direttamente risposto con la scala numerica, tralasciando la valutazione qualitativa. Si è anche visto che i punteggi assegnati sono stati soprattutto in termini di decine (es. 10, 20, 40…) o al massimo di cinquine (es. 55, 85…): questo probabilmente riflette l'ambiente scolastico dove i "voti" sono da 0 a 10, e per similitudine gli studenti hanno pensato in questi termini anche la scala 0-100.

Si sono tolti dall'analisi i questionari incompleti, oppure quelli giudicati in qualche modo inaffidabili (la risposta qualitativa avrebbe permesso di mirare meglio le risposte numeriche e anche di valutare più facilmente i questionari). Il numero di questionari validi è quindi di 48.

La Figura 291 confronta le medie delle singole patch per i 2 Macbeth Color Checker osservati sotto le due diverse sorgenti di luce. In questo modo si può osservare per quali patch vi è una notevole differenza visiva quando osservati con le diverse lampade. Si noti come le patch 3-4-5-6-8-9-10-11-18 hanno una valutazione molto maggiore quando osservate sotto la sorgente 2 rispetto a quando osservate sotto la sorgente 1. Viceversa le patch giallo-arancioni (7-12-16) ricevano invece valutazione migliore se osservati sotto la sorgente 1. Poiché la sorgente 1 è a luce fredda, mentre la sorgente di riferimento è a luce calda, i verdi e gli azzurri vengono resi diversamente dalle due sorgenti, in particolare si avvertiranno maggiormente le differenze con la sorgente di riferimento. Con la sorgente 2 invece, che ha una CCT molto vicina a quella di riferimento si ha in generale una migliore corrispondenza dei colori (la media totale è di circa 80 contro i circa 72 della sorgente 1).

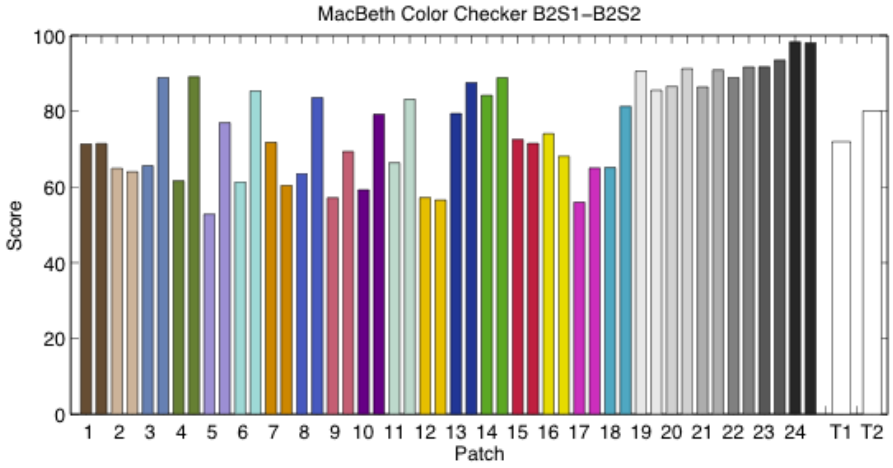


Figura 291. Risultati dell'esperimento con il Macbeth Color Checker

Di ogni patch è stato poi calcolato la distribuzione di frequenza delle risposte: in alcuni casi la distribuzione è gaussiana, come ci si potrebbe aspettare, ma in altri no (le risposte sono distribuite abbastanza uniformemente, quindi la "media" per queste patch assume un significato diverso).

Nella Figura 292 ci sono i risultati dell'esperimento con i transformers di LEGO™ (O=orange/arancione, G=green/verde, R=red/rosso, W=white/bianco, B=blue/blu, Y=yellow/giallo, T= total/totale)

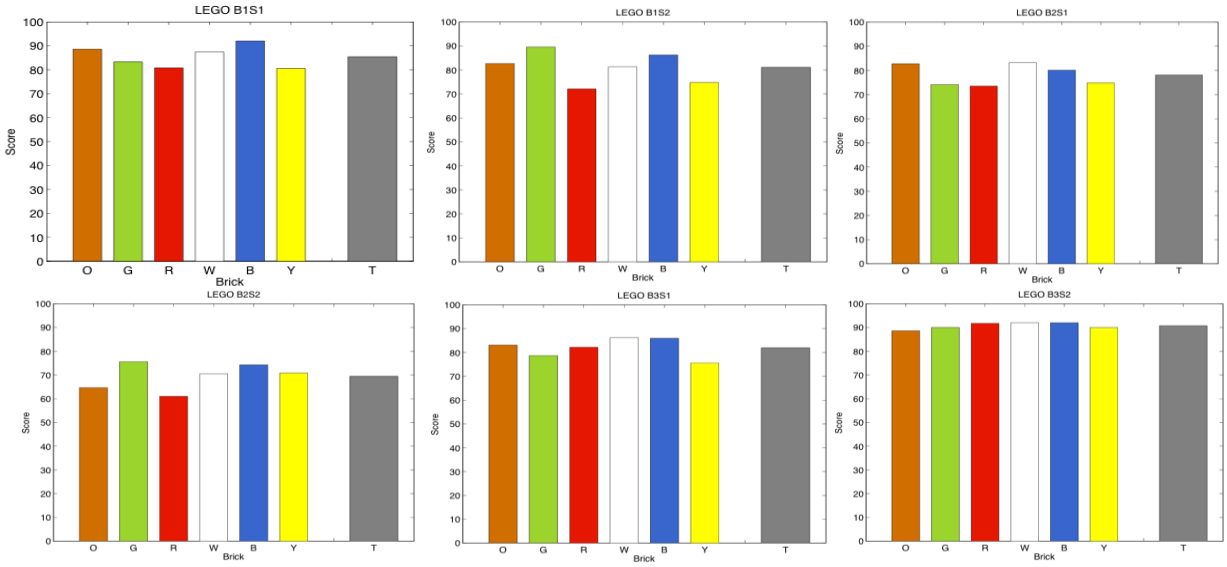


Figura 292. Risultati esperimento con i transformers di LEGO™

Nel grafico seguente (Figura 293) ci sono le medie dei punteggi di tutte le sorgenti di luce, utilizzando come i campioni le patch del Macbeth Color Checker (barre bianche) e i mattoncini LEGO™ (barre grigie).

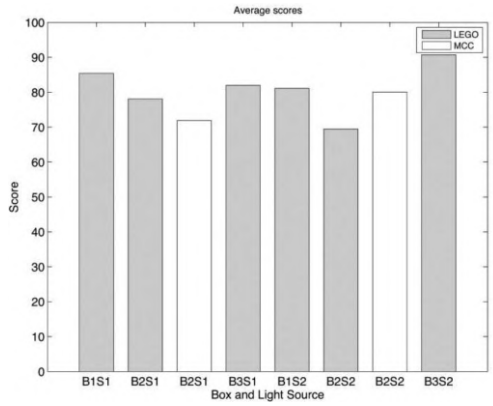


Figura 293. Medie dei due esperimenti insieme

Sono stati confrontati i risultati con quelli ottenuti su tutto il set di osservatori, quindi anche con i questionari incompleti o inaffidabili. L'andamento è quasi identico, anche se leggermente scalato (poiché ci sono più zeri che abbassano le medie).

La sorgente di luce che si comporta meglio è quella che si trova in B3S2 (Alogena), mentre quella che da risultati peggiori è quella denominata B2S2 nel caso dei LEGO™ (LED). L'altra sorgente a LED, la B1S2, ottiene invece una buona valutazione. Notiamo come B2S1 e B2S2 diano risultati piuttosto differenti a seconda che si stia considerando una scena 3D (LEGO ™) o 2D (Macbeth Color Checker), tuttavia non è possibile mettere in relazione l'uso di una scena 2D o 3D con la migliore percezione della resa visiva, poiché i due casi seguono due tendenze.

In conclusione, come mostrato dagli esperimenti realizzati, l'indice di resa cromatica così come esiste adesso non è adatto, o comunque è migliorabile, a stimare la bontà (inteso in senso ampio) di una illuminante. Per proseguire nella ricerca, una delle direzioni da percorrere potrebbe essere quella di includere un modello di percezione visiva negli indici di resa cromatica.

Esperimenti sul benessere e comfort

Quest'attività è stata condotta nell'ambito dell'accordo di collaborazione con Università Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) [Report RdS/2012/273].

Trascorriamo la maggior parte del tempo all'interno di ambienti costruiti, dove l'illuminazione è spesso prevalentemente artificiale. Nel 2002 è stato scoperto nella retina umana un terzo fotorecettore (cellule gangliari, che contengono melanopsina), responsabile della sincronizzazione dell'orologio biologico. Da questo momento è apparso chiaro che le condizioni d'illuminazione influenzano i nostri ritmi corporei in modo molto preciso: molti studi hanno indagato la relazione tra la luce e il tracciato di alcune secrezioni ormonali, in particolare i livelli del cosiddetto "ormone dell'oscurità", la melatonina, prodotta dalla ghiandola pineale in condizioni di assenza di stimolazioni luminose.

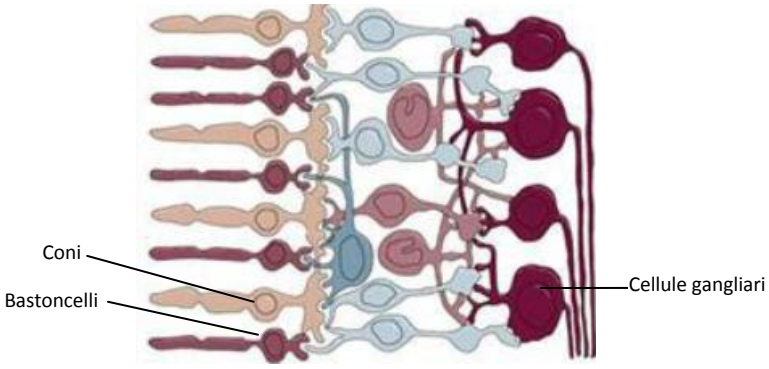


Figura 294. Fotorecettori per il sistema visivo (coni e bastoncelli) disposti interamente su tutta la retina, e fotorecettori per il sistema circadiano (cellule gangliari) disposti nella parte inferiore della retina

Sulla base di questi primi studi è stato pubblicato il Final Report della CIE 158:2004, che elenca i principi dell' "healthy lighting":

1. lo stile di vita dei Paesi industrializzati comporta un'esposizione alla luce giornaliera limitata: essa è potenzialmente così bassa da risultare dannosa per la nostra salute. Manca ad oggi un'idea chiara di quale sia la dose giornaliera di luce ottimale;
2. l'illuminazione biologica è inestricabilmente connessa al buio biologico: il mantenimento dei ritmi circadiani richiede periodi di buio da affiancare a periodi di luce. Raccomandazioni per una dose giornaliera di buio sono importanti quanto quelle relative alla dose di luce giornaliera, ma anch'esse ad oggi non esistono;
3. l'illuminazione biologica deve essere ricca nelle regioni dello spettro a cui il sistema circadiano sia più sensibile: la zona dello spettro di maggiore interesse sembra essere quella compresa nella regione blu-verde. Un approfondimento delle conoscenze permetterebbe di trasferire informazioni per la progettazione e realizzazione di ambienti e sorgenti orientati a massimizzare i loro effetti per la salute, contenendo così i problemi connessi con l'efficienza energetica;
4. un aspetto fondamentale nella determinazione dell'esposizione giornaliera alla luce è la quantità di luce ricevuta all'occhio, sia direttamente dalla sorgente luminosa, sia indirettamente dalle superfici al contorno: l'illuminazione biologica dovrebbe essere pensata sulla base della luce che arriva all'occhio, piuttosto che di quella sul piano di lavoro;
5. l'ora di esposizione alla luce influenza gli effetti dell'esposizione: la sensibilità del sistema circadiano all'esposizione luminosa varia in modo significativo durante le 24 ore; ad oggi, per le applicazioni pratiche non si conosce né il periodo di esposizione più adatto, né i tempi di esposizione.

E' stato dimostrato che un'esposizione sbagliata alla luce può causare problemi di salute. L'esistenza di un legame tra la distruzione del ritmo circadiano in relazione ad un'errata esposizione alla luce ha prodotto un gran numero di studi, che hanno raffinato le conoscenze in materia, scoprendo alcuni aspetti importanti sul sistema circadiano, come ad esempio:

- la composizione spettrale della luce è cruciale per la sua stimolazione, perché da un lato la melanopsina ha il suo picco di sensibilità nella regione del blu e dall'altro la reazione circadiana alla luce non è semplicemente la somma dei contributi di tutte le lunghezze d'onda, ma segue una legge di opponenza spettrale (giallo/blu e rosso/verde);
- la metà inferiore della retina è più sensibile alla luce rispetto a quella superiore;
- impulsi di luce a livelli di illuminamento elevati sono molto più efficaci nel sopprimere la melatonina rispetto a variazioni graduali;

il momento dell'esposizione alla luce è cruciale nel determinare la reazione dell'orologio circadiano, ma questo meccanismo non è stato ancora del tutto compreso.

Altro aspetto importante da prendere in considerazione è la relazione tra la luce e i parametri psicofisiologici. Alcuni studi sulla luce e la salute hanno provato a investigare la "sfera psicofisiologica" utilizzando diversi questionari (sull'umore, la sonnolenza,…), ma solo pochi hanno registrato i parametri psicofisiologici dei soggetti collegati all'umore per compararli con le "risposte soggettive" dei soggetti. La relazione tra la psicologia e la luce è tema più complesso da indagare rispetto a quella tra fisiologia e luce, ma altrettanto importante: nel 2009 è stata fornita evidenza preliminare che ciò che è in grado di "mettere a riposo" il sistema circadiano, ossia la luce monocromatica rossa, può allo stesso tempo attivare la reazione psicologica di allerta. Questa scoperta pone seri dubbi sulla pratica corrente legata all'uso di luce con particolari distribuzioni spettrali per ottimizzare l'allineamento circadiano, senza tener conto di possibili effetti collaterali sul piano psicologico.

E' stata svolta quindi svolta una serie di test finalizzati a una maggiore comprensione della relazione tra le condizioni d' illuminazione ambientale e le risposte psicofisiologiche dei soggetti.

Test in cabina sperimentale

Presso il DIAEE è stata realizzata una cabina sperimentale, che riproduce una stanza priva di finestre, grande a sufficienza per ospitare un tavolo con un monitor da 24 pollici. Tende nere poste dietro il soggetto evitano alla luce proveniente dall'esterno di penetrare nell'ambiente di studio. Sono state considerate due diverse condizioni di illuminazione:

- oscurità: meno di 10 lux verticali, a livello dell'occhio, dovuti al monitor del PC.
- illuminazione artificiale: circa 450 lux a verticali, livello dell'occhio, dovuti ad apparecchi a soffitto con tubi fluorescenti.

Sette soggetti (età media 25 anni, sani, e si sono astenuti da caffè e sigarette prima e durante il test) hanno preso parte al protocollo. I soggetti sono rimasti immobili nella cabina guardando il monitor di fronte a loro. Durante il protocollo sperimentale è stato somministrato un test psicofisiologico impiegato anche per scopi di ricerca psicologica, con la collaborazione di un docente della Facoltà di Psicologia di Sapienza Università di Roma. Si tratta di uno slide show temporizzato costituito da una serie di immagini: dopo 25 secondi di pausa (slide grigia), ci sono 6 secondi di presentazione dello stimolo (immagine). Le immagini sono divise in tre categorie:

- immagini negative (scene violente, animali che ringhiano, serpenti, persone ferite…);
- immagini neutre (paesaggi naturali, fiori,…);
- immagini positive (cuccioli, volti sorridenti,…).

Sono state effettuate misure relative alle condizioni di illuminazione, ai parametri fisiologici e all'umore. Prima del test c'era un periodo di "azzeramento" di alcuni minuti, in cui erano registrati gli stessi parametri.

Lo strumento "Heart and Emotion" della Elemaya Instruments è stato impiegato per registrare le variabili psicofisiologiche: Galvanic Skin Resistance (GRS, resistenza galvanica cutanea, tonico e fasico, il primo legato allo stato di calma / nervoso e il secondo alle risposte emozionali), e heart rate (HR, battito cardiaco).

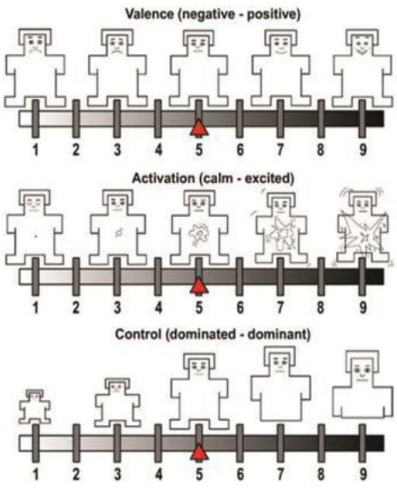


Figura 295. SAM- Self Assessment Manikin

Le informazioni sull'umore sono state ottenute con un questionario SAM (Self Assessment Manikin, Figura 295), dove le persone hanno espresso alcuni parametri che avevano associato a ciascuna immagine durante il test. Il SAM è stato sviluppato da Bradley e Lang ed è un test non verbale basato su un sistema di valutazione emozionale tridimensionale che prende in considerazione tre variabili: valenza, attivazione e dominanza. La valenza viene posta in relazione all'associazione di un'immagine con un significato positivo o negativo; l'attivazione è connessa all'umore (stimolante o calmante) che l'immagine provoca nel soggetto; la dominanza indica se l'immagine domina il soggetto o se è dominata dal soggetto.

I dati sono stati analizzati per scoprire un'eventuale relazione tra le variazioni dei dati psicofisiologici e i cambiamenti quantitativi nei parametri ambientali (livelli di illuminamento): si è visto che c'è una leggera variazione dei parametri fisiologici al variare delle condizioni di illuminazione. Le variazioni nel GSR sono statisticamente significative, mentre gli effetti delle condizioni di illuminazione sul battito cardiaco non sono ben delineate, per cui è necessaria ulteriore ricerca.

Il test effettuato è in fase di revisione in quanto la condizione di illuminazione A ricade nelle condizioni di visione mesopica, mentre la condizione di illuminazione B ricade nel campo della visione fotopica. L'esperimento è stato svolto non prendendo in considerazione questo aspetto, accettando l'ipotesi di uguale condizione e le approssimazioni che ne conseguono. I test successivi saranno orientati ad una comprensione più profonda delle differenti sensazioni evocate in un essere umano dallo stesso ambiente in diverse condizioni percettive.

Un ulteriore fattore da prendere in considerazione è che il test psicofisiologico somministrato non era randomizzato: dopo la prima somministrazione, i soggetti tendevano a intuire la sequenza delle immagini e ciò potrebbe aver causato una diminuzione dell'attenzione durante il protocollo. Nonostante ciò, i soggetti hanno mostrato ugualmente reazioni diverse in condizioni luminose diverse: questo risultato rafforza ulteriormente l'importanza dell'ambiente sulle reazioni umane.

Anche se i risultati di questo test non possono essere considerati statisticamente significativi, perché le variazioni dei parametri sono molto esigue, indicano comunque una correlazione tra condizioni di illuminazione e reazione degli esseri umani, e motivano quindi allo svolgimento di altri test in seguito.

Test in ambiente reale

Sono stati effettuati dei test che miravano a verificare ed approfondire i risultati ottenuti con il primo test, ovvero l'eventuale influenza del parametro "sorgente luminosa" sulle reazioni psicofisiologiche dei soggetti al test di risposta emotiva (lo stesso dell'esperimento precedente).
E' stato quindi usato un ambiente analogo al precedente, ma con la possibilità di modificare creare diversi scenari illuminotecnici, anche con l'apporto di luce naturale (sono quindi stati utilizzati teli mobili di vario materiale e colore). Era presente la scrivania con PC, mentre l'illuminazione artificiale era a soffitto, con tubi fluorescenti lineari.

Il test si è svolto in modo simile a quello precedente, con un periodo di azzeramento iniziale. Sono stati impiegati 4 condizioni differenti di illuminazione all'interno della cabina:

A. buio (illuminamento sull'occhio: 10 lux)
B. solo luce artificiale (illuminamento sull'occhio: 460lux)
C. luce artificiale e luce naturale (illuminamento variabile >550lux)
D. luce naturale (illuminamento variabile).

Per avere informazioni sullo stato d'animo dei soggetti, a ognuno di loro è stato chiesto di descrivere su di un foglio di carta il proprio stato d'animo con uno o più aggettivi prima e dopo ciascuno dei 4 test previsti. Tale scelta è stata condizionata dalla necessità di semplificare le procedure di misura, che si sarebbero complicate e allungate, con perdita di attenzione e motivazione da parte dei soggetti, con l'utilizzazione di una scala grafica oggettivamente elaborabile. In figura un esempio del questionario.

Stati d'animo			note
buio	prima	agitato	
	dopo	confuso	
artificiale	prima	tranquillo	
			il riflesso sullo schermo rende difficile concentrarsi sulle immagini
	dopo	distratto	troppa luce
art+naturale	prima	affaticato	
	dopo	stanco	
naturale	prima	tranquillo	
	dopo	tranquillo	

Figura 296. Esempio di questionario

Comunque, al fine di poter disporre d'informazioni oggettive elaborabili sullo stato d'animo, è stato utilizzato il SAM su un soggetto di riferimento (soggetto zero) prima dello svolgimento del protocollo di misurazione; tale test è stato somministrato in condizione di sola luce artificiale, e di contemporanea presenza di luce naturale e artificiale.

Dai grafici riferiti al soggetto zero, si notano alcuni mutamenti a seconda della condizione ambientale:

- nella condizione di luce artificiale, l'attivazione assume i valori minori
- nella condizione di luce naturale schermata la valenza risulta minima e l'attivazione massima

L'analisi dei dati evidenzia come le reazioni variano in maniera consistente al variare della condizione ambientale. Anzi, la condizione ambientale è molto più influente della tipologia dello stimolo (positivo, negativo o neutro) sulla reazione psicofisiologica dei soggetti: le differenze per tipologia di slide, infatti, non si scostano molto dalla media fatta su tutte le slide. Ci si aspetterebbe che a un aumento del battito cardiaco corrispondesse una diminuzione della resistenza cutanea, ma ciò avviene solo nelle condizioni A e B: nella condizione C si ha un'alta frequenza cardiaca ed un'alta resistenza galvanica cutanea. Nelle condizioni B e C ci sono variazioni significative legate al tipo di slide.

Il test psicofisiologico somministrato non è ancora in questa fase stato randomizzato, per cui i soggetti già alla seconda somministrazione conoscevano le immagini, nonostante la sequenza di presentazione poteva essere alterata. Per questo alle successive ripetizioni del test è sicuramente diminuita l'attenzione. Altri fattori di disturbo

sono stati il rumore proveniente dall'esterno dell'area test, oppure l'alta temperatura ambiente, dove la sudorazione ha influito sulla misura della resistenza elettrica cutanea.

Comprendere l'influenza dell'illuminazione ambientale sulle reazioni umane è cruciale perché può condurre verso nuove regole per il "lighting design" a seconda delle caratteristiche e delle funzioni di un ambiente costruito. Finora, ciò che è stato scoperto ha portato alla comprensione dell'importanza della luce ambientale per le reazioni fisiologiche sulle persone rispetto a differenti tipi d'immagine: i risultati di questo primo test devono essere intesi semplicemente come un punto di partenza per ulteriori sperimentazioni, in particolare su sorgenti luminose con differente spettro. Si ritiene importante approfondire la conoscenza del ruolo della direzione della luce perché, come precedentemente menzionato, la densità di fotorecettori circadiani è piuttosto differente tra la retina superiore e quella inferiore. E' inoltre opportuno studiare il ruolo della distribuzione spettrale di diverse sorgenti luminose perché il fenomeno di opponenza spettrale non è stato ancora completamente compreso e tradotto in una buona pratica di illuminazione.

B. Ricerca su materiali per dispositivi a OLED e LED

L'obiettivo B è finalizzato alla realizzazione di prototipo OLED per lo studio e messa a punto di particolari aspetti del suo processo di realizzazione e del suo funzionamento: estrazione ottica e tempo di vita, strato protettivo. L'attività si inquadra in termini di efficienza energetica e risparmio energetico e mira a portare valore aggiunto a prodotti della industria italiana di settore [Report RdS/2012/282].

Lo sviluppo e le prestazioni dei dispositivi organici sono fortemente limitati dal degrado che i materiali utilizzati per realizzarli subiscono quando vengono esposti all'aria, poiché reagiscono chimicamente con l'ossigeno ed il vapore acqueo presenti nell'atmosfera. Tali reazioni modificano completamente i materiali, causando un veloce peggioramento del funzionamento dei dispositivi portandoli alla rottura irreversibile.

Per prevenire ciò, si sono sviluppati diversi tipi di protezione dei dispositivi, genericamente indicati come "incapsulamento", che consistono nel racchiudere i dispositivi ed i materiali più deperibili all'interno di volumi sigillati ed impermeabili all'ossigeno ed all'acqua. Le soluzioni sviluppate si differenziano per il tipo di dispositivi a cui sono dedicate (per substrati rigidi o flessibili, con materiali depositati in modo conforme ai dispositivi o su altri substrati che vengono incollati a quello dei dispositivi, ecc.).

In particolare, un metodo molto promettente è quello chiamato "thin film encapsulation" (TFE), che prevede di utilizzare materiali formati da una successione di strati sottili di tipo diverso, ciascuno con una propria funzione. Un sistema multistrato è in generale costituito da un'alternanza di strati di materiali organici (od anche ibridi organico-inorganico, quali nanodispersioni o nanocompositi) ed inorganici, come ad esempio Al_2O_3 o Si_3N_4 da depositare tramite tecniche di evaporazione. I materiali inorganici presentano un'elevata impermeabilità intrinseca ma, in forma di film sottile, sono caratterizzati dalla presenza di alcuni difetti (pori), che però possono essere efficacemente disaccoppiati interponendo tra due strati inorganici uno strato organico. I materiali organici influenzano le proprietà meccaniche complessive, conferendo una buona flessibilità a tutto il sistema multistrato.

In tale contesto, le attività svolte hanno riguardato la messa a punto di un sistema multistrato con proprietà barriera all'acqua ed all'ossigeno, da utilizzare come film protettivo di incapsulamento per dispositivi optoelettronici organici, in particolare celle solari e OLED, in cui il materiale degli strati organici è costituito da materiali di nuova sintesi. Per gli strati inorganici, si è utilizzato Al_2O_3.

Due nuovi materiali sono stati sintetizzati per una possibile applicazione nell'ambito dell'incapsulamento di dispositivi optoelettronici organici flessibili (OLED, OPV) e la loro struttura è riportata in Figura 297.

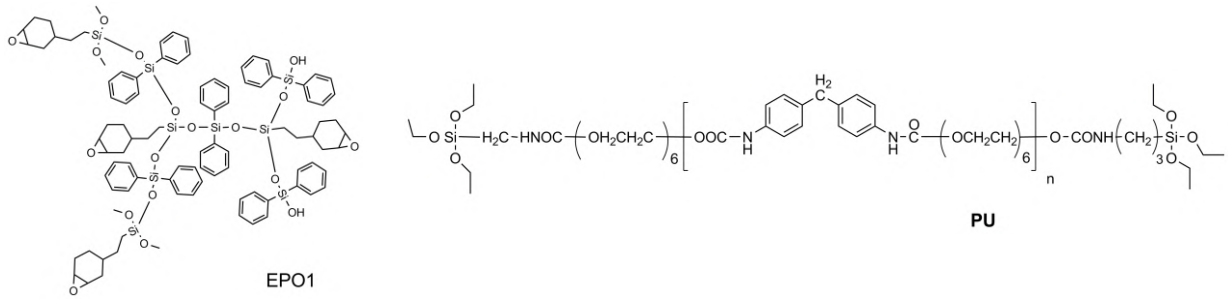


Figura 297. Struttura chimica dei materiali sintetizzati

Tali materiali sono da considerarsi ibridi organico-inorganico, in quanto costituiti da una parte organica (epossidica o poliuretanica) e una inorganica (di tipo silossanica). Entrambi i materiali sono solubili in una forma originaria, in modo da poter essere depositati come film sottili attraverso spin-coating. Tali film possono, in un secondo momento, essere reticolati ottenendo dei sistemi rigidi e insolubili.

Questi materiali sono stati utilizzati per la realizzazione di sistemi multistrato depositati su lastre di PEN, in cui al materiale di sintesi si alternava un materiale inorganico, Al_2O_3, depositato via evaporazione termica. I sistemi multistrato così preparati sono stati utilizzati come incapsulanti di dispositivi OLED fabbricati su substrati di vetro, come mostrato in Figura 298. Per caratterizzare le prestazioni delle barriere preparate, su ogni substrato alcuni OLED sono stati lasciati non incapsulati.

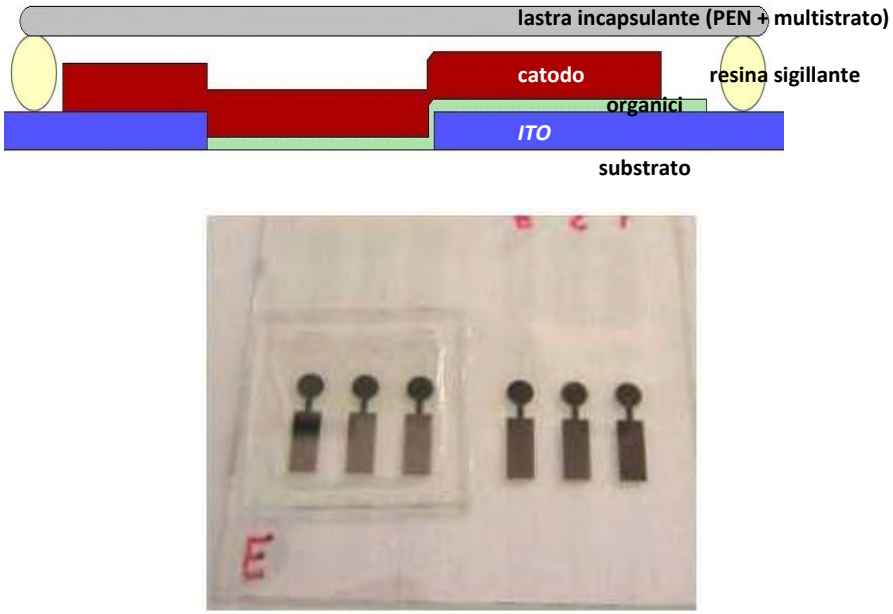


Figura 298. Rappresentazione schematica e foto di un dispositivo OLED incapsulato con un film di PEN ricoperto da un multistrato

Si sono registrate le prestazioni degli OLED sia appena preparati sia dopo 20 giorni di permanenza in aria (Figura 299). I dispositivi non incapsulati, dopo tale intervallo di tempo, sono risultati non funzionanti. I dispositivi incapsulati col sistema multistrato precedentemente descritto, risultavano invece ancora attivi, con una lieve diminuzione (circa il 25 %) rispetto alle prestazioni iniziali, indipendentemente dal materiale di sintesi utilizzato nella realizzazione del multistrato.

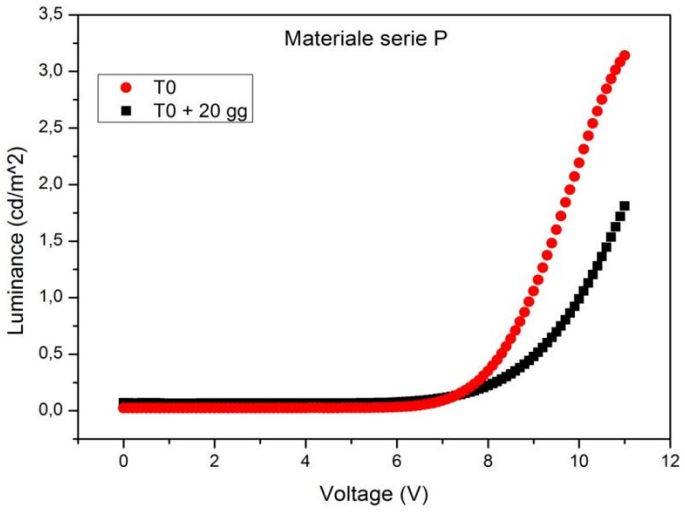


Figura 299. Elettroluminescenza a tempo zero e dopo 20 giorni di un OLED incapsulato con film multistrato di PEN

Sulla base di questi interessanti risultati preliminari, si prevede l'ampliamento del presente studio, sia attraverso un esame dell'effetto apportato da un incremento del numero di diadi "materiale inorganico-materiale di sintesi", sia attraverso l'esplorazione di diversi solventi per la deposizione del materiale di sintesi al fine di migliorare la compatibilità col materiale inorganico.

C. Sviluppo di sistemi innovativi di smart lighting

In quest'ambito è proseguita essenzialmente la ricerca sui dispositivi innovativi della "famiglia" PLUS e sono state sviluppate nuove applicazioni.

Inoltre è stata effettuata l'integrazione della strumentazione del laboratorio di ENEA Ispra per permettere un range più ampio di attività sperimentale, specialmente orientata ai componenti sviluppati nel presente progetto.

Ricerca progettuale e realizzazione di PLUS SENSE

Nel PAR 2008-2009 è stato progettato un apparecchio di illuminazione a LED per aree urbane, denominato PLUS. I concetti importanti sono contestualizzazione, modulo, dematerializzazione, superficie planare, multilayer, flessibilità, parassitismo. In altre parole, oltre all'illuminotecnica classica, al fine di rispondere alle esigenze della contemporaneità, bisogna tener conto della qualità della luce, bellezza percepita dello spazio in cui stare, sostenibilità, salvaguardia dell'ambiente, informazione e servizi forniti all'utente.

Figura 300. Concept di PLUS

Nella successiva annualità (PAR2010) è stata studiata l'integrazione di sistemi Smart nel modulo di illuminazione PLUS, a partire da alcuni scenari:

- *predicting*: una ragazza che torna a casa di notte
- *navigating*: un anziano signore che guida verso casa una notte d'inverno

Si è anche cominciato a pensare a scenari ancora diversi per PLUS, come uno sviluppo specifico per l'illuminazione Stradale (ME), e uno scenario "*analyzing*", cioè rilievo sperimentale del pattern di utilizzo dello spazio pubblico notturno.

La ricerca si è quindi concentrata su una situazione urbana notturna, dove un pedone che percorre una strada ha bisogno di sicurezza e orientamento nella strada, ed è stata svolta un'analisi dello scenario.

Il concetto è di inserire, secondo determinati criteri, una videocamera IP e utilizzare questa videocamera per dimmerare opportunamente uno o più apparecchi. Inoltre, il collegamento in rete permette ulteriori servizi (ad esempio la vigilanza al fine di assicurare la sicurezza delle persone con collegamento ad un centro di gestione e controllo

Figura 301. Sviluppo Smart di PLUS

in grado di intervenire in tempo utile).

La ricerca della presente annualità parte dalla scelta di utilizzare il modulo EYESENSE, indicando l'utilizzo di una videocamera IP che invii i dati mediante onde convogliate all'interno di una LAN come strumento tecnologico utile al controllo e al monitoraggio della strada [Report RdS/2012/274].

La realizzazione del nuovo modulo "PLUS SENSE" prevede una serie di fasi consequenziali finalizzate alla creazione di un prototipo di un prodotto di illuminazione SMART completo e funzionante che integri i moduli PLUS e sia installabile in maniera provvisoria e sperimentale per alcune prove di verifica:

- progettazione di massima del modulo PLUS SENSE
- identificazione e selezione degli componenti di controllo: videocamera
- identificazione e selezione dei componenti di controllo: gestione elettronica
- recupero dei componenti in commercio con modifica eventuale e integrazione del precedente progetto
- design dimensionale e funzionale del modulo
- design dimensionale e funzionale del sistema di aggancio
- realizzazione del prototipo
- assemblaggio delle parti
- prove sperimentali: misura e verifica.

La selezione dei materiali e delle tecnologie utilizzabili è stata orientata verso elementi esistenti sul mercato e facilmente reperibili mentre il design del modulo stesso e del sistema di aggancio al palo sono stati semplificati al massimo per ottenere un risultato apprezzabile e funzionale a livello prototipale.

Per quanto riguarda la videocamera IP, sono stati considerati importanti i seguenti fattori:

- capacità di rilievo del video sensore (apertura del fascio in base alla geometria della strada e altezza di montaggio, risoluzione, velocità di scansione dell'immagine)
- definizione di caratteristiche relative alla forma del dispositivo (dimensionalmente integrabile al modulo PLUS)
- capacità di resistenza a basse e alte temperature per applicazioni in esterni Inoltre si rende necessario:
- protezione rispetto dall'ingresso di polveri e acqua (IP6X).

Un benchmarking del mercato ha portato all'identificazione di diversi prodotti, di cui sono stati esaminati vantaggi e svantaggi. E' stato quindi scelto il prodotto da inserire in PLUS SENSE.

Contemporaneamente una indagine di mercato ha portato a identificare i prodotti per la gestione e il controllo del PLUS SENSE completo di videocamera.

E' stata quindi scelto un produttore per la realizzazione del PLUS SENSE, che dunque assembla i prototipi PLUS già esistenti, con alimentatori e driver, la videocamera, i dispositivi per controlli e gestione nel punto luce e ha costruito gli elementi strutturali Cover- Scossa inferiore - Testapalo e ne è stato realizzato un prototipo.

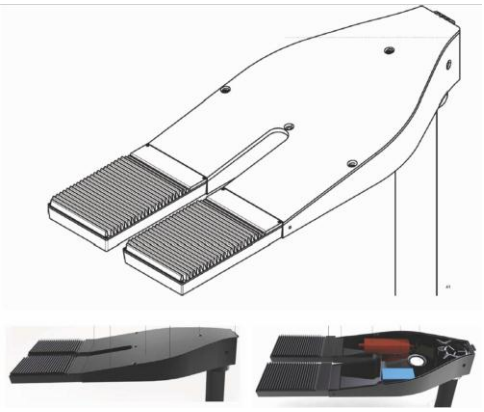


Figura 302. PLUS SENSE

PLUS SENSE risulta così composto:

Motore luminoso (2)	PLUS
LED Driver (2)	LED DRIVER(on board): RECOM modello RCD-48-0.50 con dimming digitale o analogico (1-10 V)
Alimentatore (2)	(nel corpo dell'apparecchio): MEAN WELL modello LPF-60-42 con tensione di 42 V.
Videocamera IP	AXIS M5014 Telecamera mini PTZ (brandeggiabile) a colori da interno IP51.
Sistema di gestione e controllo	UMPI Elettronica: • 1 centralino di telecontrollo Andros per quadro elettrico con 1 circuito monofase (Andros CMS, Andros TR, Andros PLS, PAROS, Cap3, PHIL 30D) • 1 dispositivo di controllo apparecchio a LED SYRA E • 2 Bridge BPL
Elementi strutturali	Neri S.p.A., realizzazione su misura

Ricerca progettuale di PLUS ME

Scopo di questa ricerca è quello di progettare un sistema ottico a LED adatto ad illuminare una strada a traffico motorizzato per applicazione in strade urbane [Report RdS/2012/275].

La visione, proseguendo lungo il percorso iniziato con PLUS, è:

+ ELSE & LESS, trasformazione formale con riduzione di materiale
+ OPEN SYSTEM, longevità di sistema tramite modularità
+ RESPONSIBILITY, efficienza ed efficacia

Quindi il metodo è il design by components.

I requisiti sono quelli della categoria illuminotecnica MExx (in riferimento alla norma UNI EN 13201-2: 2004), per il caso più frequente nell'illuminazione urbana, ossia le strade urbane di tipo F. Risulta quindi che la categoria illuminotecnica più performante a cui dovrà rispondere il progetto sarà la classe ME3a, mentre i requisiti meno rigorosi saranno quelli previsti dalla categoria ME6.

I principali obiettivi riguardano la realizzazione di un apparecchio modulare con un basso numero di sorgenti luminose (rispetto ad altri prodotti già presenti sul mercato) che consenta di ridurre gli ingombri e i materiali, e creare la condizioni per un design di un prodotto originale e innovativo. In particolare dunque si tiene particolarmente conto dell'efficienza energetica del sistema e della modularità del sistema per un'applicabilità scalare dell'apparecchio in diverse situazioni impiantistiche.

La fase iniziale della ricerca si è focalizzata su uno studio dello stato dell'arte utile ad esaminare alcune delle soluzioni ottiche disponibili sul mercato per trarne alcune considerazioni tecniche per il successivo sviluppo del prodotto. Oltre a ciò è stata fatta una selezione e un analisi comparativa tra le prestazioni delle sorgenti LED e dei componenti ottici ad oggi effettivamente disponibili sul mercato tali da poter essere applicati nel modulo PLUS ME.

Sono state in particolare considerate sorgenti LED appartenenti a due tipologie: power LEDs e COB (Tabella 63).

Tabella 63. Dispositivi presi in considerazione per il progetto di PLUS ME

Power LED con efficienze luminose non inferiori a 120-130 lm/W per temperature di giunzione Tj=25°C e temperatura di colore tra 4000-4700 K e indice di resa cromatica pari a 70	• CREE XM-L • CREE XP-G • LUMILEDS REBEL ES • LUMILEDS LUXEON M
COB[25] con potenza specifica da 30-50 W e flussi nell'intorno di 100 lm/W per temperature di giunzione Tj=25°C e temperatura di colore tra 4000-4700 K COB	• SHARP • CITIZEN • BRIDGELUX

La scelta di questa particolare tonalità della luce è compromesso tra le necessità impiantistiche e le performance dei LEDs attualmente sul mercato.

Occorre considerare che il prodotto dovrà confrontarsi con le performance di apparecchi con sorgenti tradizionali a luce bianca equipaggiate con alimentatori elettronici, ad esempio lampade a ioduri metallici molto efficienti (118 lm/W, CCT 2800K).

Sono elencate qui alcune caratteristiche da prendere in considerazione per lo sviluppo del prodotto; alcune di queste richieste sono conflittuali e di conseguenza l'attività di design del prodotto dovrà cercare il miglior punto di compromesso:

- Modularità: il concetto di modularità dovrà essere trasformato rispetto a quanto previsto nel corso del progetto PLUS precedente: in base alla soluzione ottica selezionata, la soluzione modulare dovrà essere valutata dal punto di vista ottico e meccanico/produttivo. Esempi di possibili soluzioni[26]: Apparecchio Power LED e ottiche free-form (usato anche nel PLUS), Apparecchio Power LED e ottiche riflettenti, COB e ottica riflettente.

[25] chip on board. I COB hanno la loro naturale applicazione nei prodotti per interni, dove è molto importante l'alta qualità della luce: si trovano quindi molti prodotti con CRI >80, mentre per il caso stradale un valore di 65-70 normalmente risulta più che adeguato a soddisfare le esigenze di progetto.

[26] la descrizione delle soluzioni è nel Report tecnico di riferimento

- Scalabilità: deve poter essere possibile ridurre il numero di LEDs impiegati in funzione della categoria illuminotecnica piuttosto che i valori della corrente di alimentazione a parità del numero di semiconduttori impiegati (una voce di costo importante nel prodotto è data dalle sorgenti). I costi per questa operazione sono diversi per Power LEds E COB.
- Efficienza: risulta il punto chiave del progetto e dipende essenzialmente da tre aspetti:
    - Efficienza delle sorgenti LEDs impiegate: i Power LED offrono ad oggi una maggiore efficienza rispetto ai COB. Non occorre però dimenticare che anche la disponibilità di lenti free-form rappresenta un aspetto da non trascurare: LED molto recenti sul mercato potrebbero ridurre le opzioni sul numero di lenti disponibili
    - Efficienza del sistema ottico. In linea generale, le lenti free-form offrano una maggiore possibilità di controllo del flusso luminoso rispetto alle ottiche a riflessione. Ci sono anche soluzioni miste in senso longitudinale e trasversale.
    - Efficienza termica, intesa come la capacità del sistema di dissipare in maniera efficace il calore prodotto alla giunzione. Questo importantissimo aspetto è esaminato, in genere, cercando un compromesso tra diverse esigenze tra cui quella di contenere i pesi, gli ingombri e costi (essenzialmente dovuti al materiale) e quella di non penalizzare eccessivamente le prestazioni dell'intero sistema. Anche qui le soluzioni per power LED e COB sono diverse
- Comfort: questo aspetto prescinde dal rispetto dei requisiti di abbagliamento presenti nella norma UNI EN 13201: si tratta di valutare quella sensazione fastidiosa e molesta dovuta la fatto che i livelli di illuminamento in esterni sono relativamente bassi, mentre le componenti dell'apparecchio, quali ad esempio lampade e superfici riflettenti , tendono ad essere molto brillanti (abbagliamento molesto).
- Richiamo stilistico alle linee dell'apparecchio ENEA PLUS: l'obiettivo è di difficile realizzazione per la soluzione basata su COB e ottica riflettente. La precedente realizzazione era caratterizzata da spessori ridotti, resi possibili dall'impiego di lenti free-form; l'impiego di un riflettore in abbinamento ad una sorgente estesa comporta la necessità di abbracciare un angolo solido sufficientemente ampio affinché la luce sia indirizzata nella direzione desiderata e questo comporta necessariamente la creazione di un sistema dotato di una certa profondità.

Sono state proposte 3 diverse configurazioni di COB con ottiche riflettenti, evidenziandone vantaggi e svantaggi.

Sono quindi state esaminate alcune delle soluzioni ottiche disponibili sul mercato (come semilavorato o prodotto finito) al fine di trarne alcune considerazioni tecniche per lo sviluppo del prodotto. In particolare: Nactus di Khatod, TLED SL-CX02, TLED SL-CM01, FRAEN F2L3-1-RE, Edison EMPW-C60MXRG-12X, Soluzione power led+ ottiche, OSRAM STREETlight Advanced - SLA1, LEDIL STRADA DW e DN, LEDLINK, evidenziandone caratteristiche, vantaggi e svantaggi.

Per confrontare le performances dei diversi componenti ottici selezionati e per la validazione del progetto, occorre definire una geometria di impianto. L'impianto di riferimento stato definito così:

- disposizione dei centri unilaterale
- rapporto altezza (h) su larghezza dalla carreggiata (L) pari a 1 (L=8m)
- inclinazione rispetto all'orizzontale: 0°
- sporgenza dei centri sulla carreggiata compresa tra 0 e 1,2 m
- manto stradale C2 con Q0=0,07
- fattore di manutenzione 0,8

Su questa base si sono effettuate una serie di verifiche impiantistiche relative ad apparecchi a LEDs utilizzando i dati fotometrici dichiarati dai costruttori. Si osserva che per soddisfare le condizioni impiantistiche fissate, la potenza elettrica varia tra 119 W e 139 W, con un illuminamento medio compreso tra 16 e 17 lux. I maggiori problemi si riscontrano nel raggiungimento del requisito di uniformità longitudinale o nel raggiungimento del valore di luminanza media che in taluni casi risulta inferiore di circa il 5% rispetto al limite di 1 cd/m^2. Il progetto del sistema ottico deve quindi produrre prestazioni confrontabili con quelle degli apparecchi del mercato, con particolare attenzione alla potenza elettrica impegnata. Da qui una serie di vincoli: potenza impegnata, efficienza del sistema ottico, presenza di vetro di copertura, coefficiente di manutenzione, temperatura di giunzione.

Da questa analisi preliminare è stato sviluppato un progetto di massima che indica le performance desiderate e i vincoli del prodotto di illuminazione utilizzati nella fase di progettazione del modulo vera e propria.

In particolare, lo stadio di progettazione del modulo PLUS ME prevede una focalizzazione su tre elementi che vengono sviluppati in parallelo: l'apparato ottico, l'apparato termico e la funzionalità meccanica del prodotto. La fase di progetto del sistema ottico di un apparecchio SSL inizia con la modellazione della sorgente LED o del sistema LED con lente per ottenere una serie di simulazioni fotometriche che tengano in considerazione della

fotometria delle lenti secondarie e delle eventuali ombreggiature tra le stesse, la coppa di protezione e eventuali schermature del supporto meccanico del modulo. La fase di progetto relativa alla dissipazione si basa su una simulazione termica di una serie di dispositivi che variano in base alla geometria ("forma" del modulo) e alla tipologia di alettatura per ottenere una temperatura di giunzione prossima al valore di 70 °C. Infine la fase di progettazione meccanica del modulo si è focalizzata sul massimizzare le funzioni ottiche e termiche e allo stesso tempo mantenere le minime dimensioni, i minimi ingombri e utilizzare al minimo i materiali in una forma modulare.

Il progetto finale del PLUS ME: un modulo dotato di 8 LED (2 moduli con 4 LED CREE XM-L selezione T6 per modulo) accoppiati a lenti secondarie con distribuzione asimmetrica del flusso luminoso (4 lenti LEDIL STRADA 2DW e 2 DN), e un sistema di dissipazione integrato (in alluminio verniciato o anodizzato) e una coppa di protezione (garantisce il desiderato valore di protezione del vano ottico rispetto all'ingresso idi polvere e acqua). Tali moduli sono combinati in maniera tale da ottenere apparecchi di illuminazione di diversa taglia: 4 moduli per le classi ME3a, 3 moduli per le classi ME4A, 2 moduli per le classi ME5. In questo senso, l'apparecchio di illuminazione completo PLUS ME non è pensato come un unico elemento monoblocco ma, diversamente, è caratterizzato da tre blocchi logici funzionali: ausiliari elettrici (alimentazioni e sistemi di diagnostica, controllo e comunicazione intelligente, se presenti, integrati nel sistema di fissaggio al palo), attacco al palo e ai moduli e motori luminosi in quantità diverse in base all'applicazione impiantistica.

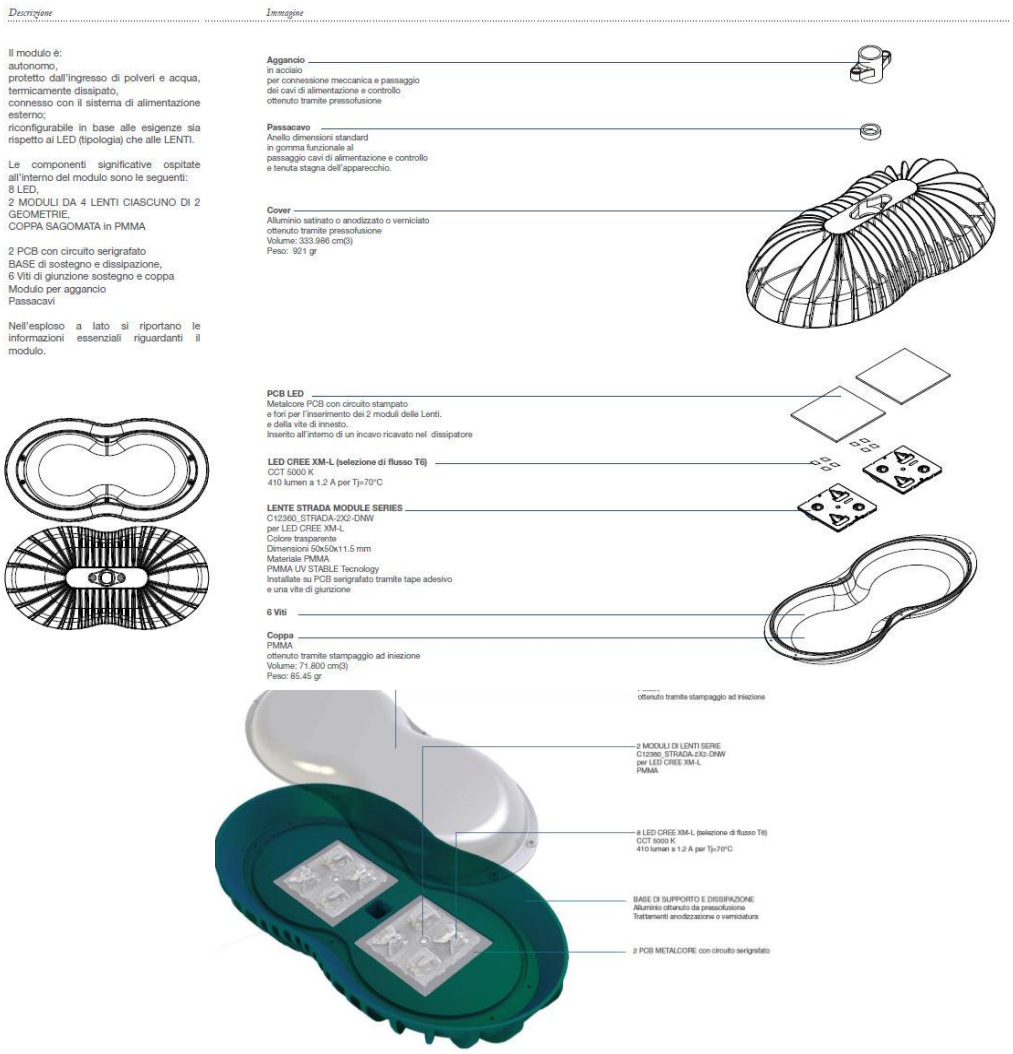


Figura 303. Componenti di PLUS ME

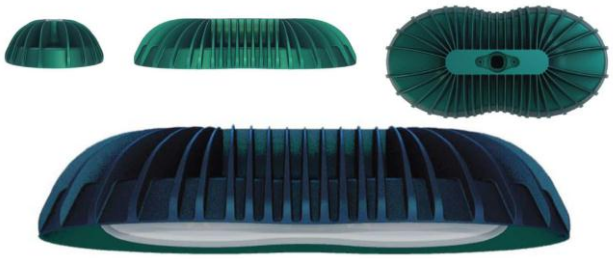


Figura 304. PLUS ME

Nel Report di riferimento, in allegato, c'è una ampia trattazione sulla corrispondenza tra categoria illuminotecnica e numero di moduli (Figura 305), nonché i risultati impiantistici di ciascuna configurazione dell'apparecchio rispetto all'impianto di riferimento.

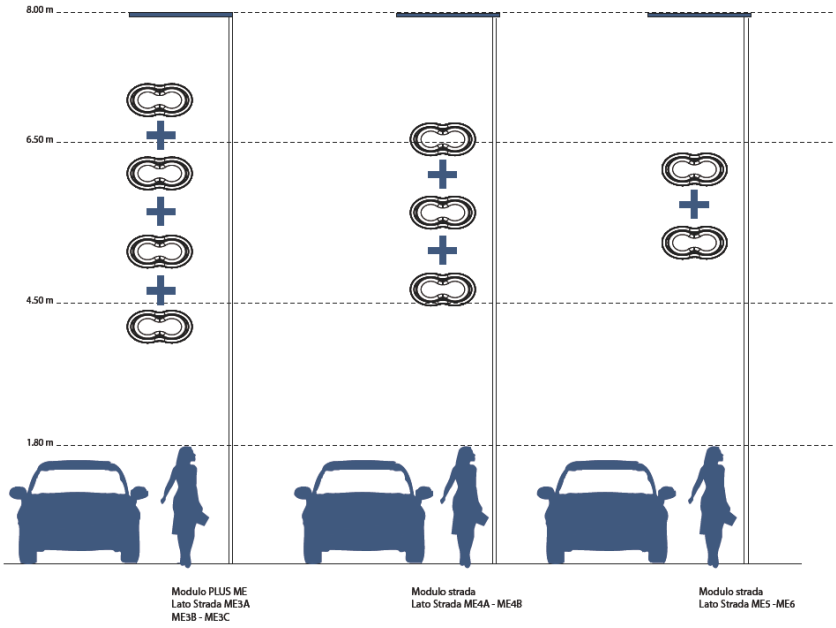
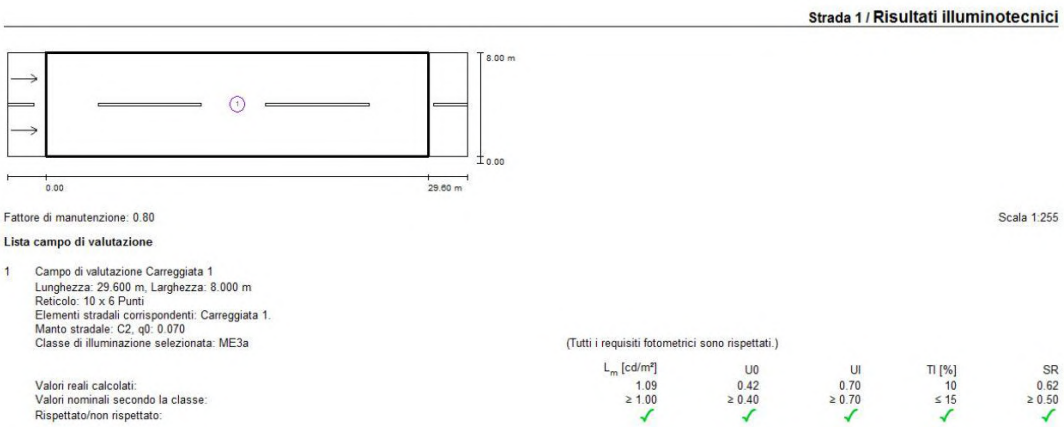


Figura 305. Corrispondenza tra categoria illuminotecnica e numero di moduli dell'apparecchio. Altezza di installazione H=8m, con larghezza della carreggiata pari a 8m. Disposizione centri luminosi su una fila con interdistanza pari a 3,7 H

Si riporta qui un esempio di risultati illuminotecnici:



Strada 1 / Risultati illuminotecnici

8.00 m
0.00
0.00
29.60 m

Fattore di manutenzione: 0.80

Scala 1:255

Lista campo di valutazione

1 Campo di valutazione Carreggiata 1
Lunghezza: 29.600 m, Larghezza: 8.000 m
Reticolo: 10 x 6 Punti
Elementi stradali corrispondenti: Carreggiata 1.
Manto stradale: C2, q0: 0.070
Classe di illuminazione selezionata: ME3a

(Tutti i requisiti fotometrici sono rispettati.)

	L_m [cd/m²]	U0	UI	TI [%]	SR
Valori reali calcolati:	1.09	0.42	0.70	10	0.62
Valori nominali secondo la classe:	≥ 1.00	≥ 0.40	≥ 0.70	≤ 15	≥ 0.50
Rispettato/non rispettato:	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 306. Risultati illuminotecnici per strada ME3a

A titolo di esempio si riporta il concept relativo alla configurazione a 4 moduli, adatta alla categoria illuminotecnica ME3a.

Figura 307. Possibili concept di prodotto, utilizzando 4 moduli per il soddisfacimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a

Il peso di ciascun modulo è pari a circa 1 kg, e risulta così suddiviso tra i due componenti principali:

- 921 g per il dissipatore in alluminio
- 85 g per la coppa in PMMA.

Il sistema di alimentazione è stato posto al di fuori del modulo, nel sistema di fissaggio al palo, per le considerazioni di natura termica illustrate in precedenza. La scelta è caduta un alimentatore TCI Smart Street 150, che garantisce l'intensità di corrente desiderata (1200 mA). L'alimentatore è in grado di alimentare 4 moduli collegati in serie fornendo una tensione massima di 115 V alla corrente di 1200 mA: il suo posizionamento lontano da altre fonti di calore dovrebbe consentire di non superare la massima temperatura di 80°C sul punto di test.

Una nota conclusiva importante: Il processo di progettazione ha occupato circa 6 mesi dell'anno durante i quali sono state introdotte nel mercato numerose novità nel campo dei LEDs e delle componenti ottiche. L'idea di un apparecchio modulare si dimostra quindi la soluzione migliore per aggiornare il prodotto a fronte di questi continui cambiamenti tecnologici e prestazionali delle componenti LED, senza dover rivedere il progetto in maniera totale. Qualora si volesse realizzare un prototipo del modulo PLUS ME sarebbe necessario rivedere e aggiornare la parte relativa alle sorgenti LED e le ottiche, selezionando nuovamente le componenti più performanti presenti sul mercato.

Per quanto concerne la parte di design dell'apparecchio completo, la presente ricerca si è focalizzata principalmente sul fornire una serie di proposte concettuali che, in maniera del tutto dimostrativa, visualizzino le diverse possibilità formali e funzionali di tale idea modulare e destrutturata.

Ricerca e Misure su sorgenti e prototipi

Sono state studiate dal punto di vista fotometrico e colorimetrico le performance di alcune sorgenti LED e sistemi ottici di diversi costruttori, al fine di ottenere dei dati affidabili per la successiva fase di progettazione del modulo ENEA PLUS ME per l'illuminazione urbana a traffico veicolare [Report RdS/2012/276].

Le valutazioni sono state effettuate sulla base dei confronti impiantistici, in una geometria tipo, avendo come riferimento i requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.

Dal punto di vista della caratterizzazione colorimetrica, per ciascuna sorgente LED o complesso LED+Ottica, a seconda dei casi, è stata determinata la temperatura di colore (CCT), il valore di alcuni indici di resa cromatica CRI

e CQS e il legame tra questi parametri di "qualità" della luce con l'efficacia del sistema analizzato, espressa in termini di Luminous Efficacy of Optical Radiation (LER[27]).

Il legame tra LER e CRI e tra LER e CCT è molto discusso nella letteratura scientifica e risulta determinante per la scelta delle caratteristiche del LED da utilizzare per la progettazione del modulo PLUS ME.

Le misure sono state condotte essenzialmente su sistemi ottici maggiormente diffusi sul mercato, scelti in accordo con i risultati e le considerazioni iniziali di progetto per PLUS ME. La seguente figura elenca i dispositivi ottici misurati, le sorgenti LED relative e il montaggio su dissipatore.

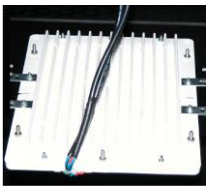
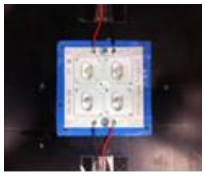
Ottica	Sorgente e montaggio	Foto
Kathod Nactus KNAC4801A 48 LEDs	LUMILEDS REBEL ES ANSI LXML-PWC1-0100 V0 C, su MCPCB con i 48 LEDs + dissipatore in materiale plastico termoconduttivo appositamente realizzato	
TLED_SL ST 01 (2 +2 LEDs)	CREE XT-E, su metal core PCB + interfaccia termoconduttiva + dissipatore commerciale a bassa resistenza termica.	
LEDIL C12360 STRADA 2x2 DNW	CREE XM-L alimentato a 1.2 A, su metal core PCB + interfaccia termoconduttiva + dissipatore commerciale a bassa resistenza termica	
LEDIL C12362 STRADA 2x2 DWC		
LEDIL C12419 STRADA 2x2 A-T		

Figura 308. LED e ottiche con dissipatore provati

Si noti che in un caso è stato realizzato un dissipatore appositamente realizzato, di materiale plastico termoconduttivo. Si è quindi potuto valutare l'efficacia di questo tipo di materiali in alternativa all'alluminio, in quei casi in cui il peso dell'apparecchio risulta un fattore determinante di scelta. I principali requisiti per i materiali plastici termo-conduttivi possono essere sintetizzati nelle seguenti caratteristiche :

- La conducibilità termica deve essere considerevolmente più elevata rispetto a quelli medi della plastica (per i polimeri la conducibilità termica oscilla tra 0,1 W m^{-1} K^{-1} e 0,3 W m^{-1} K^{-1} , e risulta sensibilmente inferiore a quella tipica dei metalli che supera 100 W m^{-1} K^{-1}
- Il materiale (compound termo-conduttivo) deve poter essere facilmente formato mediante tecnica di stampaggio a iniezione senza l'impiego di attrezzature dedicate
- La prestazioni meccaniche e la resistenza agli urti devono essere adeguate a garantire il funzionamento del prodotto senza rotture per usura o per cadute o urti
- Il materiale deve possedere una elevata stabilità dimensionale, in modo da evitare problemi nelle fase di assemblaggio con altri componenti realizzati con altre tecnologie
- Il comportamento termico deve essere "soddisfacente" fino a 100 °C
- Il materiale deve risultare resistente agli agenti chimici e al vapore in modo che non si producano fratture da tensione nei pezzi stampati
- La dilatazione termica del materiale deve essere comparabile a quella dei metalli (si evitano rotture e problemi di assemblaggio).

[27] il LER rappresenta la potenza ottica relativa dello spettro di emissione utile alla visione comparata con la potenza ottica totale emessa.

Questa soluzione non risulta adatta a quei casi in cui l'efficienza dell'apparecchio debba rappresentare la principale caratteristica del prodotto (come nel caso del PLUS ME), ma i risultati di misura possono essere comunque utilizzati per una valutazione della distribuzione fotometrica del sistema ottico esaminato.

I test principali sono stati: distribuzione fotometrica (con goniofotometro a specchio), grandezze elettriche, irradianza spettrale (con spettroradiometro e sfera integratrice), da cui si sono calcolati gli indici detti sopra.

Figura 309. Montaggio del dissipatore commerciale all'interno della sfera integratrice. Questa soluzione consente il rapido montaggio di sistemi ottici di diversi costruttori all'interno della sfera per la loro misura colorimetrica

A causa delle differenti condizioni di funzionamento dei diversi dispositivi esaminati, per l'elaborazione dei dati si è proceduto come segue:

- LEDIL: sono stati valutati i rendimenti di ciascun modulo attraverso il rapporto tra il flusso luminoso emesso dal sistema completo e del solo LED. Per la fotometria C12360 2x2 DWN è stato determinato il valore minimo del flusso emesso dal sistema ottico per il raggiungimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.
- Khatod Nactus: a causa del particolare sistema di dissipazione adottato, è stato valutata la rispondenza ai requisiti della classe ME3a rispetto ai parametri di uniformità generale, longitudinale e SR e di abbagliamento andando a ricercare il valore minimo di flusso emesso dall'apparecchio che consentano il soddisfacimento di tali requisiti. Sulla base di tale informazione, tenuto conto del modello di LED utilizzato e della sua CCT, sarà possibile determinare la corrente di alimentazione e la temperatura di giunzione necessarie al raggiungimento di tale obiettivo (numero di LED fisso). Non è stato possibile determinare il rendimento del sistema ottico perché sigillato al dissipatore.
- T_LED: anche qui viene valutata la rispondenza ai requisiti della classe ME3a rispetto ai parametri di uniformità generale, longitudinale e SR e di abbagliamento andando a ricercare il valore minimo di flusso emesso dall'apparecchio che consenta il soddisfacimento di tali requisiti. Non è stato possibile determinare il rendimento del sistema ottico perché solidamente fissato al MCPCB.

Il Report tecnico di riferimento [Report RdS/2012/276] presenta i risultati dei test sui diversi campioni, evidenziando pregi, difetti e potenzialità degli stessi per differenti applicazioni.

Sono state esaminate infine le performance fotometriche del modulo ENEA PLUS SENSE, in corso di prototipazione: l'apparecchio condivide il sistema ottico modulare con la precedente realizzazione ENEA PLUS, di cui risulta una naturale evoluzione ed esempio di applicazione delle nuove tecnologie "smart".

Sono analizzate le differenze nella distribuzione fotometrica tra i moduli equipaggiati con le vecchie lenti e quelli aggiornati (sistema di fissaggio della lente al MCPCB) con il nuovo modello di lenti.

Le fotometrie ottenute da ciascuno dei due moduli, sono state combinate tra loro, ottenendo i corrispondenti file fotometrici *.LDT e *.IES al fine di realizzare tutte le possibili configurazioni del prodotto ENEA PLUS.

A tale scopo è stata implementato un "indice di similitudine" tra due fotometrie, definito in letteratura[28], che viene abitualmente utilizzato per comparare le performance di diversi sistemi di misura che caratterizzano lo stesso dispositivo.

Nel Report tecnico sono presentati tutti i dettagli delle misure eseguite: la conclusione è che le prestazioni fotometriche prima e dopo la modifica sono molto simili.

Impianto sperimentale per prove su componenti sviluppati nel progetto

Il laboratorio di illuminotecnica di Ispra è stato arricchito con nuova strumentazione, in particolare una sfera integratrice di 1,80 m di diametro, in cui si può misurare tipicamente il flusso luminoso di sorgenti e apparecchi di dimensioni medie (ad esempio PLUS).

L'area esterna del laboratorio, già predisposta per prove a lungo termine di parametri illuminotecnici ed elettrici dei dispositivi di illuminazione, è stata corredata di un set di 6 pali mobili su cui montare apparecchi in prova.

Gli elementi principali del laboratorio sono:

- cella di prova
- dispositivo per misure su tubi di luce
- sfera di Ulbricht e banco ottico per misure su LED
- 2 spettroradiometri: uno per misure sul visibile, uno con estensione a vicino UV e IR (range 230 – 1000 nm)
- 6 light boots (1m x 1m x 0.8 m) per prove di percezione e sulla resa cromatica
- strumentazione portatile per campagne sperimentali (luxmetri, luminanzometri, misuratori di coordinate cromatiche…)
- camera climatica per prove a diverse temperature ambiente e umidità relativa
- strumentazione termografica
- goniofotometro (raggio di misura 55 cm)
- sfera di Ulbricht 1.80 m diametro
- strumentazione per misure dei parametri elettrici
- stabilizzatore di tensione
- area esterna per misure su sistemi di illuminazione pubblica, inclusi sistemi di regolazione e gestione
- set di 6 pali mobili (altezza fino a 8 m), su cui possono essere montati gli apparecchi in prova

Si fa notare che è possibile effettuare misure spettroradiometriche sia nel goniofotometro che nella sfera integratrice.

L'impianto sperimentale è dunque pronto per quanto riguarda le prove di PLUS /PLUS SENSE, sfruttando uno dei pali mobili.

Attualmente è in corso l'installazione della struttura meccanica di STAPELIA, su cui sarà cablato il sistema: STAPELIA nasce già con il "suo" palo, e quindi si è deciso di non modificare questo layout. In ogni caso, dato l'elevato peso e le notevoli dimensioni dell'oggetto, oltre alla necessità di fissare il "fiore" con una determinata inclinazione sul palo, non sarebbe stato possibile utilizzare un palo mobile.

Per maggiori dettagli sul laboratorio di illuminotecnica dell'ENEA di Ispra si rimanda al rapporto RdS/2012/303.

D. Sviluppo di una sperimentazione dimostrativa di "smart village" e metodi di progettazione

L'obiettivo ha riguardato la realizzazione di una sperimentazione pilota di uno "Smart Village" e la verifica delle metodologie per la progettazione di interventi urbani di "smart lighting" attraverso l'analisi di dati relativi a casi pilota.

D.1 Realizzazione dimostrativa

Attraverso la realizzazione dello Smart Village è stato possibile qualificare sperimentalmente servizi smart (applicabili anche in ambito urbano), in cui il sistema di illuminazione (outdoor) diventa l'infrastruttura abilitante per applicazioni intelligenti, quali "smart lighting" (controllo adattivo della illuminazione), "smart building networks" (gestione centralizzata della illuminazione interna e climatizzazione gli edifici) e "smart mobility" (gestione centralizzata della mobilità), con il fine di sviluppare un modello integrato per un insediamento che si

[28] ASJ Bergen, "A pratical method of comparing luminous intensity distributions", Lighting Reserch and Technology 2012 44:27-36. L'algoritmo proposto è stato sviluppato dall'autore come procedura di confronto tra le fotometrie ottenute da misura di campo lontano e di campo vicino, all'interno dei lavori della Division 2 Technical Committees CIE.

propone anche come una soluzione di base estendibile, con opportune rielaborazioni, a situazioni urbane ("smart town") [Report RdS/2012/053].

L'area prescelta per la dimostrazione è quella del C.R. ENEA Casaccia dove già in precedenza sono state effettuate alcune installazioni, per cui si è preferito continuare il percorso realizzativo avviato nelle annualità precedenti dell'Accordo di Programma.

In particolare, nel corso del PAR 2008-2009 sono state eseguite le prime realizzazioni riguardanti il sistema di illuminazione adattiva delle torri faro del parcheggio del CR Casaccia e la gestione energetica dell'edificio F40; queste prime sperimentazioni hanno mostrato la validità degli approcci "smart lighting" e "smart building" per cui si è proseguito nella progettazione di un'area più ampia all'interno del CR Casaccia, in cui proseguire con queste e altre applicazioni da sperimentare e qualificare.

Nel PAR 2010 è stata sviluppata la modellistica necessaria al modello integrato di smart town e alcune componenti tecnologiche strategiche nonché sono stati fatti alcuni primi studi di fattibilità tecnico-economica su applicazioni su territori urbani definiti. In particolare è stata progettata la architettura funzionale per una piattaforma integrata per la Smart Town di diagnostica, ottimizzazione e controllo remoto di tutte le applicazioni sopra citate e permette di creare un "core" di dati condivisi.

In considerazione di quanto sopra, la attività dell'obiettivo D del par 2011 hanno quindi previsto :

- la applicazione della metodologia di ***smart lighting*** attraverso la sperimentazione del controllo adattivo sull'impianto delle torri faro del CR Casaccia realizzato nei precedenti PAR e la progettazione e realizzazione di un viale a led con telegestione adattiva nel CR Casaccia;
- l'applicazione della metodologia ***smart building networks*** alla diagnosi dell'edificio F40; la progettazione e realizzazione di una rete di 8 edifici a controllo remoto; lo sviluppo di un sistema di simulazione per lo identificazione della strategia ottimale di controllo degli edifici realizzati.
- l'implementazione dell'applicazione ***smart mobility*** con lo sviluppo di un sistema di analisi dei flussi pedonali all'interno del CR Casaccia;
- la realizzazione di una ***Piattaforma ICT*** per il monitoraggio, la diagnostica, il controllo ed l'ottimizzazione real time dell'intero sistema dello Smart Village dotata sia del server di raccolta dei dati che della piattaforma integrata di diagnostica, ottimizzazione e controllo remoto sviluppata nel PAR 2010. Tale piattaforma è situata in una control room specificatamente allestita all'interno dell'edificio F40;
- la predisposizione di un programma per lo sviluppo futuro dello Smart Village con il coinvolgimento di attori industriali al fine di ingegnerizzare le soluzioni messe a punto.

Le attività svolte da ENEA in collaborazione con il Politecnico di Torino, con l'Università Politecnica delle Marche e con l'Università degli Studi di Roma Tre sono descritte in dettaglio nei rapporti:

- RdS/2012/053 Sviluppo di una sperimentazione dimostrativa di "Smart Village" e metodi di progettazione
- RdS/2012/054 Sviluppo di un approccio per la gestione ottimale di edifici integrato nella rete della pubblica illuminazione : applicazione su Smart Village CR Casaccia
- RdS/2012/229 Sviluppo di una metodologia per la diagnostica remota di reti di edifici integrata nella rete della pubblica illuminazione : applicazione su Smart Village CR Casaccia"
- RdS/2012/230 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

L'architettura dello Smart Village

Le applicazioni smart prese in considerazione per lo Smart Village si basano su tecnologie innovative disponibili sul mercato, che però includono funzionalità più avanzate, in particolare l'utilizzo delle tecnologie della computing intelligence con un approccio *"resource on demand"* ossia fornire il servizio esattamente nel luogo, nel tempo e nella intensità richiesta.

L'architettura dello Smart Village ha come infrastruttura di base il sistema dell'illuminazione pubblica su cui sono stati integrati altri servizi smart, quali la gestione della mobilità interna e reti di edifici a controllo remoto, il tutto gestito da una piattaforma integrata ICT localizzata in una control room (Figura 310).

Figura 310.Planimetria dello Smart Village presso il C.R.ENEA Casaccia

Applicazione e sperimentazione di un sistema di smart lighting per il controllo impianto illuminotecnico delle torri faro presso il CR Casaccia.

Il sistema di smart lighting delle torri faro è stato progettato ed installato nel precedente PAR ed il lavoro sviluppato in questa annualità è consistito nella sperimentazione ed analisi dei dati.

L'applicazione poggia su un sistema di telegestione dell'illuminazione pubblica che consente di monitorare costantemente lo stato degli impianti, conoscere in tempo reale il dettaglio dei guasti, decidere con flessibilità come, dove e quando accendere, spegnere o ridurre il flusso luminoso del singolo punto luce. Questa caratteristica consente quindi di rilevare dettagliatamente i guasti e lo stato di funzionamento della singola lampada. L'utilizzo delle onde convogliate (PLC - Power Line Communication) permette di comunicare con il singolo lampione sfruttando la rete elettrica esistente, senza dover aggiungere nuovi e costosi cablaggi. Nella seguenti figure sono riportate una schematizzazione del sistema installato e la schermata del pannello di controllo web. I flussi dati (lampade e video) vengono convogliati via linea elettrica ad un quadro di telecontrollo connesso alla LAN del C.R. Casaccia. Da qui i dati vengono trasferiti via internet ad un server remoto accessibile via browser web attraverso il normale protocollo http (Figura 311):

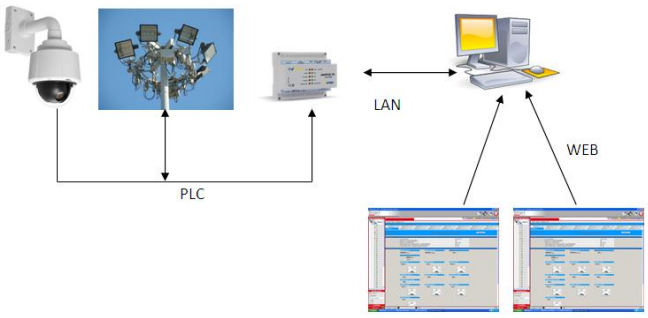


Figura 311. Architettura logica sistema di monitoraggio e controllo

L'installazione è stata piuttosto articolata e complessa in quanto ha richiesto le seguenti fasi

- sostituzione lampade (in tutto 64) con SAP 400 W
- installazione moduli
  - Syra-D (64, 1 per ogni punto luce): modulo periferico per diagnostica, alimentazione lampada, comunicazione su linea alimentazione con tecnologia PLC
  - Telecamere Axis (2)
- configurazione quadro di telecontrollo.

Nella Figura 312 viene riportato lo scenario ripreso da una delle due telecamere installate. Tale scenario si riferisce al parcheggio interno al C.R. Casaccia (oggetto dello studio e della sperimentazione) nonché della via anguillarese (sulla destra) e di un vialetto interno di prevalente mobilità pedonale (sulla sinistra).

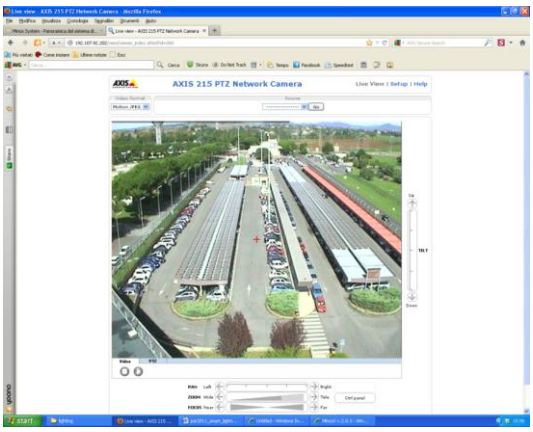


Figura 312. Scenario da una telecamera

La fase sperimentale ha riguardato due aspetti :

1. l'analisi dei flussi video delle telecamere
2. applicazione di strategie di controllo

L'analisi dei flussi video è stata effettuata con un sistema di elaborazione delle immagini real time sviluppato da ENEA che consente di identificare gli oggetti in movimento basandosi sulla differenza tra i frame acquisiti, il background estratto periodicamente dalla scena ed una media pesata dei frame immediatamente precedenti a quelli acquisiti. Per una descrizione più approfondita dell'implementazione e dei risultati ottenuti con tale sistema si rimanda al Report RdS/2011/329.

Per la sperimentazione sono state analizzate le registrazioni del parcheggio del C.R. ENEA. I test sono stati effettuati su tre diverse aree di interesse del parcheggio, sia per verificare la correlazione tra i risultati ottenuti sulle diverse aree sia per verificare il comportamento del sistema in situazioni di notevole difficoltà, come nel caso dell'area di interesse posta in una zona dell'immagine in cui gli oggetti in movimento sono avvistati con difficoltà anche ad occhio nudo. Sono stati individuati tre differenti tipi di configurazione al variare delle condizioni d'illuminazione che consentono di ottenere buoni risultati in tutti gli scenari in cui le condizioni atmosferiche consentono una buona analisi.

Al contrario è stato riscontrato un peggioramento critico delle prestazioni in presenza di condizioni atmosferiche avverse quali pioggia, neve, nebbia (Figura 313). Qui è emerso il primo limite dell'approccio sviluppato benché in tale condizioni la normativa prescrive di non dimmerare il flusso luminoso e pertanto la specifica richiesta al sistema è limitata alla identificazione di quando tali condizioni si verifichino al fine di evitare la dimmerazione.

Figura 313. Esempi di occlusioni della telecamera (pioggia e neve)

Un ulteriore problema tecnico riscontrato riguarda la trasmissione dati. La banda effettiva garantita dalla comunicazione in power line non si è rivelata sufficiente per trasportare flussi video ad un frame rate costantemente accettabile quando la distanza supera i 100 metri (pertanto la telecamera più lontana posta a 300 m aveva un frame rate troppo limitato mentre quella posta a 100 m aveva un frame rate appena accettabile, ma spesso incostante). Una delle soluzioni è stata quella di abbassare la risoluzione della immagine con relativo decadimento della qualità considerando che la distanza di ripresa è elevata come si può osservare nelle immagini riportate.

I risultati complessivi finora ottenuti, a causa delle difficoltà incontrate risultano ancora lontane dalle aspettative e la conclusione cui siamo pervenuti è che la tecnologia PLC a banda larga non è ancora sufficientemente robusta per il trasporto di flussi video sulle distanze normalmente necessaria alle applicazioni stradali qualora si voglia procedere alla analisi automatica delle immagini.

Per questo motivo è stata avviata una linea di ricerca che non prevede il trasporto del flusso video ma prevede l'intera analisi delle immagini direttamente a livello della singola telecamera. E' stato effettuato uno studio ad hoc

e la procedura è stata giudicata fattibile associando alla telecamera un CPU per l'analisi dati. Potendo lavorare ad alta risoluzione ed a pieno frame rate (25 frame al secondo) le difficoltà finora incontrate sarebbero risolte. Dal punto di vista del costo del singolo sistema questo sarebbe ancora contenuto (circa 3000 euro per telecamera + sistema di analisi immagini + sistema di trasmissione dati) e potrebbe essere compatibile con le reti PLC a bassa banda quali vengono normalmente utilizzate da diversi anni.

Questa direzione è quella che ENEA intende intraprendere e qualificare nel prosieguo dello sviluppo della metodologia di smart lighting.

Progettazione e realizzazione di una smart street con utenza ibrida veicolare-pedonale ed edifici uffici

Nell'ambito delle applicazioni di smart lighting presso il C.R. Casaccia è stato progettato e realizzato un impianto dimostrativo pilota su scala reale diverse tecnologie altamente performanti e innovative già disponibili sul mercato: la tecnologia led, la tele gestione punto-punto, il controllo ottimizzato degli edifici. Peer quanto riguarda l'impianto di illuminazione del viale, grazie all'elevata efficienza dei led, consente di ridurre la potenza impiegata mentre la possibilità di telegestire il singolo punto luce permette di adattare il flusso luminoso erogato alla domanda dell'utenza.

Nella sperimentazione che sarà condotta si intende ricostruire il profilo dell'utenza integrando dati e informazioni provenienti da diversi sistemi di analisi del traffico:

A. Il sistema di controllo degli accessi al Centro;
B. Sensori posizionati agli ingressi degli edifici che prospettano sul viale;
C. Telecamere poste alle estremità del percorso.

Nella sperimentazione in Casaccia si ipotizzano differenti scenari, per i quali sono richieste determinate prestazioni illuminotecniche a garanzia del comfort e della sicurezza, legati ai differenti tipi di utenza: pedonale, veicolare o ibrida (pedonale e veicolare).

La possibilità di simulare differenti scenari, associata alla completa disponibilità dei dati, consente di testare e qualificare differenti modelli di gestione dell'illuminazione adattiva sia in termini di strategia di controllo che di scelta della tipologia dei sensori da impiegare tenendo conto del rapporto costi/benefici.

Le soluzioni testate presso la Casaccia potranno essere replicate nella città dove si possono presentare le stesse tipologie di utenze anche se con differenti categorie illuminotecniche.

Pertanto le informazioni provenienti dai differenti sistemi di analisi del traffico verranno integrate al livello di sistema centrale per ottimizzare le seguenti logiche di gestione adattiva:

- a breve termine basata su modelli previsionali che consentono di aggiornare di ora in ora il profilo di gestione delle lampade in funzione del traffico atteso nell'ora successiva;
- dinamica con attivazione istantanea, prevede la rilevazione in tempo reale della richiesta dell'utenza da parte di un sistema intelligente che regola la luce al massimo livello quando vi è attività, diminuendola al minimo quando non si registra alcun movimento, così da realizzare una sorta di onda di luce che accompagna l'utente nel suo percorso.

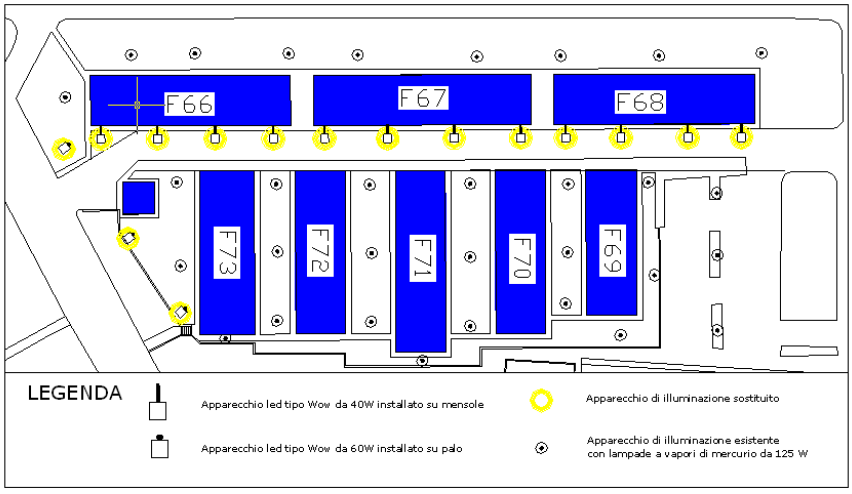


Figura 314.Planimetria del viale led-smart

Sullo stesso viale su cui è stato sviluppato il progetto per il viale led-smart, è stata progettata una rete di edifici smart (8 edifici) in modo da combinare i dati provenienti dagli edifici con quelli della illuminazione outdoor al fine di prevenire ad un modello di viale interamente controllato ed ottimizzato.

Sulla base dei primi dati di monitoraggio e delle criticità emerse durante l'installazione dell'apparato di misurazione nell'edificio F40, è stata individuata la strumentazione da installare all'interno di un gruppo degli 8 edifici, tra loro molto simili dal punto di vista architettonico ed impiantistico. Lo sviluppo della metodologia di diagnostica è stata effettuata da ENEA in collaborazione con il Politecnico di Torino [Report RdS/2012/229].

Nel contesto globale di rete è infatti possibile confrontare i comportamenti energetici dei vari edifici e pertanto individuarne in tempo reale eventuali andamenti anomali, a parità di condizioni d'esercizio; l'obiettivo è individuare un sistema di monitoraggio, diagnostica e controllo degli edifici replicabile e a costi contenuti. Esso si basa sulla progettazione di una rete capillare di sensori su ogni singolo edificio che permette di remotizzare in tempo reale le informazioni acquisite e trasferirle tramite rete a una piattaforma ICT integrata che gestisce e ottimizza i consumi energetici.

Il cluster di 8 edifici ha una superficie complessiva di circa 3400 m^2; ne vengono monitorati e gestiti i consumi elettrici e termici, con il contestuale rilevamento della presenza del personale negli edifici e delle condizioni ambientali.

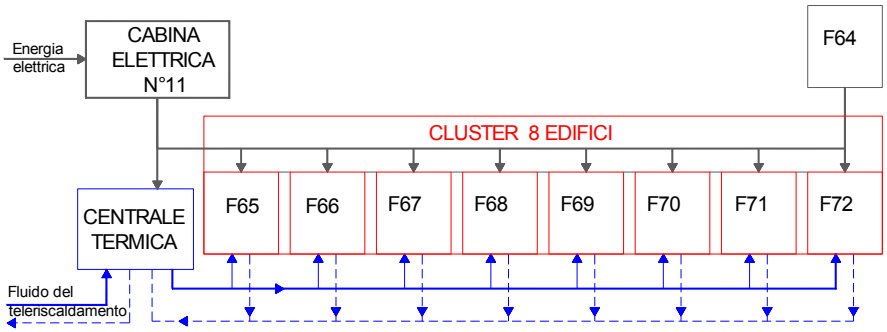


Figura 315. Schema della rete impiantistica a servizio del cluster

I consumi elettrici monitorati a livello di edificio riguardano usi finali quali l'illuminazione, la climatizzazione e la forza motrice, mentre a livello di sottocentrale termica si misurano i consumi elettrici generali e quello dei gruppi frigo.

I consumi termici degli impianti presi in esame riguardano sia la centrale termica del cluster che ciascuno degli otto edifici tramite postazioni di controllo delle calorie/frigorie.

La possibilità di monitorare la presenza di personale all'interno degli edifici consente di definire dei parametri per la gestione delle utenze energetiche; le metodologie utilizzate si basano su un sistema di rilevamento delle timbrature badge e sui sensori di presenza appositamente installati su ogni edificio in prossimità degli ingressi.

Il monitoraggio dei parametri ambientali consente di gestire da remoto le funzionalità del condizionamento e dell'illuminazione; riguarda sia le condizioni ambientali interne, tramite sonda installata internamente agli edifici, sia quelle esterne tramite la centralina meteo presente in prossimità dell'edificio F40.

Il sistema di monitoraggio realizzato presso il cluster consente di effettuare una diagnosi dei consumi energetici del cluster e definire delle strategie di controllo ottimizzato da remoto in grado di modulare la fornitura di energia, termica ed elettrica, secondo la logica dell'*energy on demand*. Infatti, considerando l'entità della presenza degli occupanti e le condizioni ambientali, sia interne che esterne, si può controllare da remoto l'erogazione del servizio di illuminazione a livello di singolo edificio e del viale su cui prospettano gli 8 edifici oltre alla climatizzazione sia a livello locale che di centrale termica.

Smart Building Network: diagnosi e controllo del sistema di edifici dello Smart Village, applicazione al controllo della illuminazione di interni e della climatizzazione

Insieme al Politecnico di Torino ed alla Università Politecnica delle Marche, ENEA ha condotto un'attività articolata in diverse fasi e obiettivi finalizzati all'individuazione di metodologie innovative per la diagnostica e controllo degli edifici integrabili in un approccio Smart Village basato sull'utilizzo della infrastruttura della illuminazione esterna come sistema centrale di raccolta dati e distribuzione dei controlli e sul controllo della illuminazione interna e climatizzazione degli edifici [Report RdS/2012/054 e RdS/2012/229].

La ricerca si basa sulla precedente attività effettuata nel PAR 2010 culminata con la installazione presso l'edificio F40 del CR Casaccia, di un sistema di monitoraggio ed attuazione molto avanzato che funga da esperienza pilota per essere poi replicato sull'intera rete di edifici dello Smart Village.

Il sistema è composto di un apparato mirato alla misurazione dell'energia (elettrica e termica) e di un secondo dedicato alla misurazione dei parametri ambientali ed alla rilevazione della utenza ed è finalizzato sia a condurre analisi di tipo diagnostico (individuazione di criticità attraverso la lettura, l'interpretazione e l'analisi dei dati), sia analisi di ottimizzazione (individuazione di interventi atti a ridurre i consumi energetici e/o migliorare la qualità dell'ambiente interno attraverso attuazioni automatiche o tramite strategie di interazione con l'operatore od occupante). Monitoraggio e attuazione sono dunque stati progettati, secondo le grandezze considerate, a livello di intero edificio, di singolo piano o di stanza attiva.

La prima fase dei lavori è consistito nella verifica della completezza e congruità del sistema realizzato: dalla verifica della qualità dei dati acquisiti è emerso che il sistema installato risponde in modo corretto, secondo quanto previsto dal progetto. E' stato comunque necessario procedere ad una integrazione della strumentazione in particolare i sistemi di attuazione del gruppo refrigerante in centrale termica e relativi contacalorie per il periodo estivo. In una seconda fase è stato redatto un protocollo di funzionamento dell'edificio in quanto il sistema sviluppato presenta una struttura generalizzabile e ripetibile su altri edifici o gruppi di edifici. A seconda del caso studio, strumenti di monitoraggio, parametri da misurare e punti di misura potranno variare per adattarsi al caso specifico.

La prima linea di ricerca si è focalizzata sugli aspetti diagnostici della rete ed ha avuto come scopo l'individuazione di un metodo robusto per l'individuazione automatica di valori anomali di energia e potenza per effettuare analisi diagnostiche concentrandosi in particolare sulle tematiche del controllo della illuminazione indoor e della climatizzazione. Per raggiungere tale obiettivo, l'analisi si è orientata allo sviluppo di una procedura di diagnostica avanzata basata sull'individuazione delle cause connesse alle anomalie riscontrabili, a partire dai dati di monitoraggio elaborati secondo grandezze e indicatori aggregati (*feature extraction*). Nello studio effettuato, per il rilevamento automatico dei valori anomali, sono stati applicati sia metodi basati sull'utilizzo di modelli inversi sia 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 all'intero edificio F40 o a una sua porzione (singolo piano). A seguito dell'individuazione dei valori anomali, sono stati introdotti alcuni indici sintetici che consentono di quantificare la severità della anomalie riscontrate e quindi di fornire informazioni circa la priorità di intervento da associare ad ognuna di esse. Il metodo proposto e implementato si è rivelato robusto e particolarmente adatto ai fini diagnostici e quindi utile a convertire dati di consumo energetico in informazioni utili all'ottimizzazione della prestazione del sistema. Infine sulla base della processo concepito per lo studio delle logiche diagnostiche attraverso cui individuare le possibili cause associate alle anomalie riscontrate, sono state implementate alcune regole di individuazione automatica delle cause associabili ad alcune tipologie di anomalie attraverso tecniche di data fusion (logica fuzzy).

Infine si è scelto di affrontare la definizione dei benchmark di consumo energetico attraverso tecniche statistiche proponendo degli indicatori energetici calcolabili a partire dai dati acquisiti nelle precedenti fasi di monitoraggio. Sono stati presi in esame e valutati diversi indicatori di consumo, rapportando il consumo (elettrico e termico) ai fattori normalizzanti ritenuti di volta in volta più opportuni. Sulla base delle statistiche degli indicatori definiti, è stato proposto il calcolo dei benchmark ai quali fare riferimento per misurare le prestazioni d'uso dell'energia del cluster di edifici oggetto di valutazione (vedi paragrafo precedente sulla smart street). Lo studio affrontato propone infine lo sviluppo di un modello di regressione rappresentante il "livello medio energetico". L'applicazione del modello, subordinata all'acquisizione dei dati per il cluster di edifici, permetterà di stabilire quali edifici si comportano in maniera efficiente e quali in maniera inefficiente.

Il secondo tema di ricerca si è concentrato sugli aspetti di ottimizzazione e controllo. Data la notevole molteplicità delle scelte possibili (sia in termini di strumentazione che di logiche di controllo) il lavoro si è orientato allo sviluppo di un simulatore che permetta di provare le varie scelte prima di procedere realmente alla loro applicazione nella rete di edifici. Per avere un riscontro sperimentale il simulatore è stato calibrato sull'edificio F40. In particolare ci si è concentrati sullo studio e la modellazione dei consumi di illuminazione interna.

Il presente lavoro è stato realizzato conseguito attraverso due linee di attività:

1. sviluppo di un simulatore dell'illuminazione dell'edificio F40 per la modellazione dei consumi energetici;
2. studio e proposta di possibili strategie per il controllo ottimo finalizzato alla riduzione di consumi energetici per l'edificio F40.

I consumi dell'illuminazione sono stati modellati mediante l'utilizzo della logica fuzzy, inserendo come principali dati in ingresso il numero di stanze attive (cioè con almeno una presenza), l'ora del giorno ed il tipo di giorno

(lavorativo, fine settimana, festivo). E' stato sviluppato un modello fuzzy a 14 regole che ha permesso di ricostruire i consumi dell'illuminazione dell'intero edificio, anche suddivisi tra sola illuminazione ed emergenza. La Tabella 64 sintetizza i principali parametri del modello a 14 regole.

Tabella 64. Schema della rete impiantistica a servizio del cluster

	Errore medio	Varianza di errore	Errore totale
Illuminazione	1,584346e-01	4,508353e+00	3,146511e+02
emergenza	1,464813e-01	1,339235e+00	2,909119e+02
somma	3,049159e-01	7,600822e+00	6,055630e+02

Smart Mobility: Sviluppo di un sistema di analisi dei flussi pedonali all'interno del C.R. Casaccia

L'applicazione di *smart mobility* è stata implementata con un sistema di analisi dei flussi pedonali all'interno del C.R. Casaccia. Tale applicazione è molto importante per capire quale realmente sia la richiesta della utenza sia per quanto riguarda la illuminazione esterna dei viali e sia quella interna degli edifici.

In particolare è stato sviluppato un software per il dialogo con il sistema gestionale degli accessi al Centro ENEA Casaccia e l'elaborazione degli stessi dati finalizzata all'analisi dei flussi di persone all'interno del centro. Il software fornisce una serie di informazioni sul numero medio degli utenti del centro in modo tale da ricostruire delle matrici origine-destinazione (ingressi-edificio di appartenenza-mensa) orarie degli spostamenti in modo tale da poter ottimizzare i profili d'illuminazione dei viali e la mobilità delle navette interne. Inoltre tale analisi sarà indispensabile per perseguire l'obiettivo di *energy on demand* su cluster di edifici, ovvero di regolare dinamicamente i flussi elettrici e termici in funzione della domanda (profilo di presenza). Il punto critico di questo approccio è quello quindi di avere uno strumento che riesca in tempo reale a ricostruire la domanda, ovvero i profili di presenza e i percorsi origine-destinazione. Le metodologie sviluppate si riferiscono ai seguenti argomenti: Database e Software di Analisi. Per il primo punto è stato sviluppato un database su tecnologia MySQL che memorizza gli accessi ai tornelli ed i risultati delle elaborazioni, per il secondo è stato sviluppato un software basato su tecnologia Java per la connessione ai dati dei tornelli e l'elaborazione dei flussi.

Tali metodologie sviluppate sono state dapprima validate sui dati reali del CR Casaccia e successivamente installate e rese pienamente operative.

Realizzazione di una Piattaforma ICT per Smart Village

Nell'ambito della realizzazione di un dimostrativo di Smart Village all'interno del CR ENEA Casaccia, è stata realizzata una piattaforma ICT dedicata all'acquisizione, elaborazione e controllo sui moduli Smart installati nel Centro [Report RdS/2012/230].

A livello logico la piattaforma è suddivisa in quattro strati, come mostrato in Figura 316.

- **Presentation Layer.** Interfaccia l'utente finale con la piattaforma tramite web application (servlet, html, jsp);
- **Application Layer.** Esegue l'attività di business intelligence della piattaforma Smart Town. In tale strato vengono eseguiti i processi di analisi e fusione dei dati, del situation assessment per la diagnostica degli edifici, di realizzazione di logiche di controllo, di gestione di allarmi ed anomalie;
- **Data Layer**. Strato relativo al datawarehouse, ovvero lo storage dei dati. E' stato realizzato un database dalla struttura modulare cui possano confluire dati di diversa natura provenienti da diverse sorgenti;
- **Sensor/Actuator Layer**. Strato contenente i moduli di interfacciamento con i sensori. Ogni modulo è dedicato ad una specifica categoria di sensori ed è completamente indipendente dagli altri nella modalità di comunicazione e di interfacciamento.

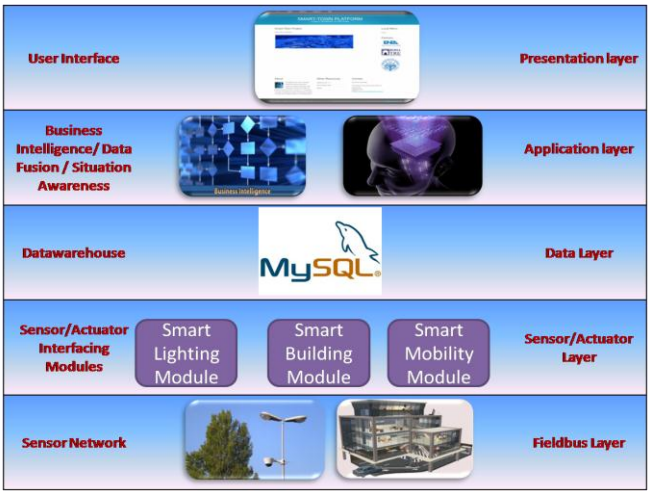


Figura 316. Architettura Piattaforma sviluppata per lo Smart Village

In particolare è stato svolto un lavoro sotto due aspetti: implementativo e sistemistico. A livello implementativo è stato realizzato un progetto Java Web Application per la parte di gestione di Web Service e pagine web statiche (html) e dinamiche (jsp), ed un progetto Java Application per la gestione della comunicazione tra la piattaforma ed i sensori, la gestione degli allarmi, l'elaborazione dei dati e l'attuazione di logiche di controllo. E' stato inoltre implementato un Database per lo storage dei dati sensoriali provenienti dai moduli Smart dello Smart Village.

Attualmente la piattaforma è predisposta per l'acquisizione/attuazione del modulo **Smart Building Network**, dedicato all'acquisizione di dati sui consumi elettrici, termici e ambientali di reti di edifici ed all'attuazione di logiche di controllo orientate al risparmio energetico. Inoltre tale piattaforma è predisposta per l'acquisizione/attuazione del modulo **Smart Lighting**, dedicato all'acquisizione dei dati provenienti dalle torri faro che illuminano il parcheggio del CR Casaccia ed all'attuazione di logiche di regolazione della potenza erogata dalle lampade nell'ottica del risparmio energetico. Infine è predisposta per il modulo **Smart Mobility**, dedicato all'acquisizione dei dati di afflusso del personale del CR Casaccia tramite il sistema dei badge.

La comunicazione tra i moduli e la piattaforma è gestita per ogni modulo con un protocollo diverso per assecondare le esigenze di sicurezza. Nel caso del modulo Smart Building è stato fatto uso di un parsing XML dei dati sensoriali via FTP tra il server EasyCon interno al CR Casaccia e la piattaforma ICT, l'attuazione dei comandi verso il server EasyCon è gestita tramite apposito Web Service. Nel secondo modulo viene effettuato un parsing XML via SFTP tra il server Minos esterno al CR Casaccia e la piattaforma, anche in questo caso l'attuazione è gestita tramite Web Service. Infine nel terzo modulo la comunicazione viene effettuata tramite protocollo ODBC, quindi direttamente tra due Database, quindi non è stato necessario effettuare un parsing.

A livello sistemistico si è lavorato sull'ottimizzazione del server che ospita la piattaforma ICT. E' stato scritto un algoritmo per la gestione e crittazione di dati sensibili. Nell'ambito della sicurezza applicativa e nell'ambito della sicurezza dei Databases, sono state studiate diverse soluzioni quali l'introduzione di tecniche di difesa del Web Server sia a livello di Bios che a livello di Utenti e gruppi, con la installazione di Tools quali per esempio Tomoyo Linux EnterpriseforSles Server. Sono stati valutati anche altri sistemi di difesa, come messa in sicurezza di Database Relazionali Open Source (MySQL Server) o di applicativi come Tomcat Apache Web Server, dei servizi di FTP etc.

Sono stati portati in qualità e testing procedurale diversi meccanismi di settaggio e configurazione di sistemi o di servizi sui Sistemi Linux laddove vi fossero ambiguità procedurali. E' stata generata una considerevole quantità di documentazione elettronica legata ai processi di configurazione e di settaggio sia dei software che dei Servizi del sistema operativo OpenSuse nelle release 12.1 e 12.X. E' stata svolta anche una approfondita ricerca sull'Accesso applicativo con servizio di Identity Service e degli strumenti possibili con i quali implementarlo come per esempio su sistemi Novell, Sun, IBM ma al momento non sono stati implementati perché richiederebbero un Sistema Enterprise di livello superiore. Per finire è stato svolto uno studio per la messa in produzione di Sistemi di pubblicazione Web in ambiente Windows mediante Web Server Apache XAMPP. Sono in fase di studio interoperabilità tra sistemi Linux e Windows, interoperabilità applicativa tra NET e Java.

Predisposizione di un programma per lo sviluppo futuro di interventi per la realizzazione dello Smart Village

Al fine di iniziare un processo di ingegnerizzazione e disseminazione delle soluzioni tecnologiche sviluppate nello Smart Village si è predisposto un programma di collaborazioni con aziende che siano disposte a sviluppare con ENEA sistemi e componenti innovativi nei seguenti ambiti applicativi:

1. Smart Lighting;
2. Smart Building;
3. Smart Mobility;
4. Piattaforma ICT.

L'interesse delle aziende ad investire direttamente nel progetto risiede nella opportunità di qualificazione da parte di un ente terzo delle loro tecnologie e nella possibilità di predisporre con ENEA proposte progettuali finanziate per sviluppare ulteriormente tali tecnologie o attivare contratti di trasferimento tecnologico per le tecnologie sviluppate da ENEA e testate sullo Smart Village.

Lo strumento proposto per attivare la collaborazione con le aziende interessate è la pubblicazione di un avviso attraverso il quale si invitano i soggetti a manifestare il proprio interesse per le attività di ricerca, sviluppo e sperimentazione per la realizzazione dello Smart Village Casaccia.

Alle aziende interessate è stato richiesto di sviluppare una o più applicazioni dello Smart Village, per le quali impegnarsi a contribuire a titolo gratuito, mettendo a disposizione strumentazione, software o servizi ICT; realizzando i relativi progetti esecutivi; partecipando alla installazione dei sistemi, elaborando l'interfacciamento tra le singole tecnologie ed il sistema di supervisione dello Smart Village; partecipando alla analisi dei risultati.

Il contributo di ENEA al programma consisterà nella messa a disposizione del Centro Ricerche Casaccia come campo sperimentale, nella fornitura delle informazioni necessarie allo sviluppo dei progetti esecutivi, nella eventuale partecipazione alla fase di installazione della strumentazione, nello sviluppo delle tecnologie intelligenti per l'integrazione del sistema di supervisione; nella qualificazione scientifica delle tecnologie impiegate ed infine nella divulgazione dei risultati ottenuti.

Le proposte saranno valutate da un Comitato tecnico composto da personale ENEA e quelle selezionate saranno rese operative attraverso una apposita convenzione.

D.2 Analisi dati di impianti realizzati e metodologie di progettazione

La linea di ricerca prevedeva la partecipazione dell'ENEA a sperimentazione già avviata da comuni particolarmente avanzati dal punto di vista di installazioni di "smart ligthing" al fine di poterne valutare l'efficacia ed il reale risparmio energetico.

Sono state esaminate varie situazioni ed è stato scelto il comune di San Giovanni in Persiceto dove la cablatura con pali intelligenti è già in fase operativa. Inoltre su questo comune oltre alla telegestione punto-punto è stato anche installato un sensore di flussi di traffico e quindi già dispone della strumentazione necessaria all'approccio di smart lighting benché non sia mai stata utilizzata in questa direzione.

Oltre alla attività di analisi in campo si è continuata l'attività di sviluppo, iniziata nel par 2010 di progettazione di elementi multifunzionali di lighting che integrino altre funzionalità smart. In questa direzione l'Università di Pisa ha condotto uno studio che mira ad ingegnerizzare il lavoro svolto in precedenza su questo tema e ad estenderlo altre componenti urbane.

Metodologia dello smart lighting: la sperimentazione a S. Giovanni in Persiceto ed il progetto di Bracciano

L'obiettivo di questo task consiste nella sperimentazione delle metodologie di 'smart lighting' sviluppate nell'ambito del PAR 2010 al caso applicativo del Comune di San Giovanni in Persiceto (BO).

Il concetto di base che è stato applicato è quello di "energy on demand", ovvero di regolare la potenza del flusso luminoso in funzione della domanda (flusso di traffico veicolare urbano). Il punto critico di questo approccio è quello di avere degli strumenti che riescano a modellare la domanda in maniera più accurata possibile. In tal modo è possibile risparmiare grandi quantità di energia e migliorare sensibilmente la sicurezza delle strade fornendo più illuminazione quando è necessaria e meno quando non serve.

Le metodologie applicate si riferiscono all'implementazione di modelli predittivi basati su reti neurali a breve di flussi di traffico veicolare urbano e le strategie di controllo.

Per le ultime sono state applicate diverse strategie per il controllo dell'illuminazione con lo scopo di tradurre il flusso di traffico predetto in potenza di alimentazione delle lampade tenendo conto dei vincoli tecnologici e delle normative stradali. In particolare sono state definite tre strategie di controllo: costante, statica e adattiva. La prima consiste semplicemente nel tenere sempre un valore di potenza fisso e costante. La seconda consiste nel definire due fasce orarie esattamente della stessa durata durante le quali si applicano, in una, la potenza massima e, nell'altra, (tipicamente la notte quando si presume un minor passaggio di veicoli) una percentuale di potenza ridotta.

La strategia adattiva invece è più raffinata. Ovvero, basandosi sulle predizioni di attività veicolare è capace di adattare ora per ora il flusso luminoso alla reale domanda del momento ottenendo così un duplice vantaggio sia in termini di risparmio che di sicurezza. Punto critico di quest'approccio è di avere un sistema di misura adeguato ed modello di predizione sufficientemente accurato.

La sperimentazione ha riguardato la validazione sia dei modelli predittivi che le strategie di controllo. Per quel che riguarda le prime si è raggiunto un'accuratezza del 4%, per le seconde nella seguente tabella viene riportato il confronto tra le diverse strategie di controllo in termini di risparmio energetico. L'indice di risparmio è stato calcolato rispetto al caso senza alcun tipo di controllo, ovvero nella condizione in cui si fornisce il 100% della potenza per tutto il periodo di illuminazione. In questa applicazione sono stati confrontati i risultati ottenibili con il "controllo statico" (approccio dei sistemi di regolazione convenzionali basato su due livelli) con il "controllo dinamico" introdotto dall'approccio "smart lighting" basato sulle reale misura del flusso di traffico. Questi i risultati in termini di rispetto energetico rispetto al caso in cui si opera in assenza di regolazione:

Controllo statico	Controllo adattivo
-11,7 %	-33,9 %

Da tali risultati è possibile notare che il controllo adattivo è in grado di fornire potenzialmente un risparmio energetico notevole, garantendo al tempo stesso la sicurezza ed il rispetto delle normative (in quanto è in grado di regolare più in basso quando non è necessario, ma anche di ritornare a valori elevati quando per motivi temporanei l'utenza è atipicamente elevata).

Anche il semplice controllo statico basato sul profilo medio statistico fornisce un risultato in termini di consumo simili al controllo costante, con il vantaggio però che varia tra due fasce e quindi segue meglio le esigenze di illuminazione nel caso medio. Inoltre, rispetto al controllo adattivo questo è molto più semplice e quindi di più facile realizzazione. In Figura 317 un esempio del diverso comportamento tra le strategie di controllo. Dalla figura si evince come il controllo adattivo fornisca energia seguendo molto fedelmente il flusso di traffico.

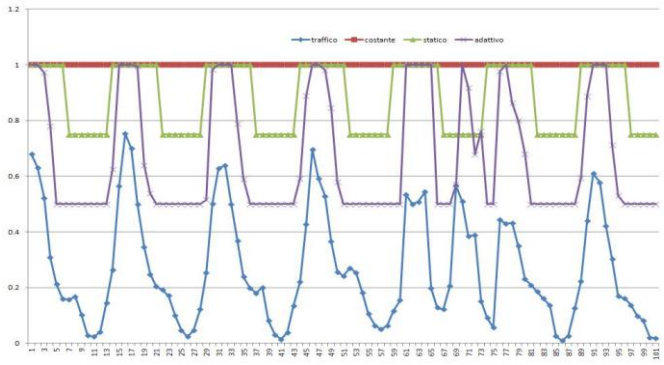


Figura 317. Diverse strategie di controllo

Sulla base di tali risultati è stata intrapresa la progettazione di una applicazione presso il comune di Bracciano dove verrà realizzata una via di circa 1 km attrezzata con sistemi di telegestione punto-punto, lampioni led e strumentazione per il controllo adattivo della illuminazione e la integrazione di servizi smart.

Metodi di progettazione di componentistica multifunzionale di public lighting

Con la Università di Pisa è stato affrontato uno studio di progettazione di alcuni elementi di arredo urbano secondo una logica smart city.

Lo studio è partito dalla ingegnerizzazione della soluzione SVEM Light sviluppata nel par 2010 per le rotonde intelligenti ed è proseguita nella direzione della applicazione della stessa modalità progettuale verso altri elementi multifunzionali di arredo urbano, diversi dei quali connessi alla illuminazione pubblica.

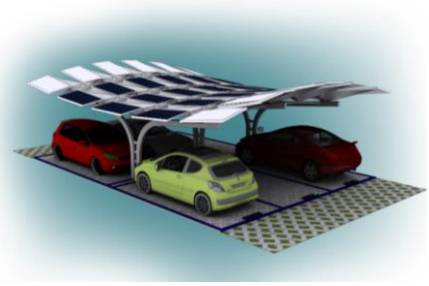
L'approccio che ha stimolato la ricerca delle progetti proposti è stato quello di individuare soluzioni puntando in particolare alla integrazione formale e tecnologica di elementi energeticamente attivi e di dispositivi Wi-Fi così come è stato fatto nel caso di SVEM Light. Il secondo e il terzo tema trattano di dispositivi per l'illuminazione che costituiscono delle reti che si estendono in gran parte della città. Questa caratteristica rende interessante l'idea di integrare hot spot Wi-Fi per diffondere la copertura di queste reti in ambito urbano. Vengono quindi individuate delle soluzioni integrate con elementi energeticamente attivi. Nel caso dell'illuminazione di aree pedonali viene individuata una soluzione capace di integrarsi anche in contesti di pregio storico architettonico.

Una delle soluzioni presentate reinterpreta in una logica smart city il concetto tradizionale di gazebo sia come struttura permanente che come allestimento temporaneo. Ne consegue l'ideazione di una struttura multifunzionale, che nel rispondere alle mutate esigenze della società contemporanea arricchisce lo spazio urbano con nuove funzioni. Una struttura che oltre ad essere allestita in parchi urbani o

giardini pubblici, può divenire elemento di integrazione dell'arredo urbano di piazze, passeggiate, o di altri contesti cittadini.

Una soluzione è stata sviluppata per servizi di bike sharing con biciclette semplici o dotate di sistemi a pedalata assistita. Lo studio di questo oggetto di arredo urbano si è concentrato principalmente sulla progettazione di un elemento modulare, capace di rendere più flessibile la gestione di questi servizi.

Infine è stata studiata una pensilina multifunzionale per il parcheggio di autoveicoli in aree di sosta a pagamento. In questo studio è stata ricercata una soluzione formale in grado di integrare sistemi per la raccolta dell'acqua piovana e pannelli solari di formato commerciale in una superficie di geometria complessa



E. Sperimentazione territoriale ed assessment dei prodotti del Network Lumiere

E.1 Partecipazione ai network nazionali e internazionali

EERA Smart Cities, Joint Programming Initiative Urban Europe

La spinta propulsiva delle impellenti necessità energetiche-ambientali è oggi un vettore per un cambiamento profondo delle città verso una sostenibilità più ampia e lo strumento che la Commissione Europea sta elaborando per governare la transizione è lo Strategic Energy Technology Plan (SET Plan). Il SET Plan si articola su due direttrici principali: le iniziative industriali (European Industrial Initiatives) e l'area della ricerca (European Energy Research Alliance).

Nel 2010, sotto la spinta del Set Plan, si è formato il consorzio europeo European Energy Research Alliance (EERA, www.eera-set.eu) che ha lo scopo di accelerare lo sviluppo delle nuove tecnologie per l'energia attraverso la creazione e l'implementazione di Joint Research Programmes allo scopo di rafforzare, espandere ed ottimizzare le capacità di ricerca sui temi dell'energia. Il consorzio EERA, fondato inizialmente da dieci istituzioni nazionali, ha via via raccolto la rappresentanza di tutti i paesi dell'Unione Europea. Il consorzio si è articolato in un certo numero di gruppi di lavoro tematici di cui uno è riferito alle Smart Cities.

Il programma Smart Cities, avviato nel 2010, è organizzato con delle rappresentanze nazionali ognuna delle quali coordina un team di istituzioni nazionali che intendono partecipare ai lavori del programma. L'obiettivo è quello di mappare la ricerca europea sulle smart city e proporre un Joint Programme coordinato. Le priorità del programma sono fissate sui seguenti quattro "sub-programmes" punti strategici in cui si sta organizzando il Joint Programme:

- Energy in Cities (Coordinato da AIT, Austria)
- Urban Energy Networks (Coordinato da ENEA, Italia)
- Interactive Buildings (Coordinato da SINTEF, Norvegia)
- Urban City Related Supply Technologies (Coordinato da TNO, Olanda).

All'interno del Sottoprogramma "Urban Energy Networks" vengono trattate le tematiche relative alle reti urbane tra cui quella della illuminazione pubblica intesa come una infrastrttura che potrebbe ospitare molte funzionalità della smart city. Questo sottoprogramma del gruppo EERA smart cities, coordinato da ENEA, è quello che raccoglie la più intensa convergenza delle istituzioni di ricerca e grandi player industriali italiani. Il sottoprogramma si articola su tre aree: Smart Energy Districts, Urban space network integration, Human factor: the citizen-city interaction. In particolare l'area Urban space network integration si rivolge alla costruzione di una integrazione molto più spinta tra le varie reti urbane proprio attraverso lo sviluppo della infrastruttura sensoristica e digitale della città. Diverse sono le reti prese in considerazione. La rete della illuminazione pubblica è considerata strategica in quanto per la sua capillarità si candida a diventare rete di pali sensoristici intelligenti per coprire l'ultimo miglio dello spazio urbano e quindi l'ossatura della rete digitale tramite tecnologie PLC (Power Line Communication) a banda larga per portare contenuti digitali sulle linee elettriche e tecnologie zigBee e Wi-Fi per la comunicazione wireless. La rete elettrica flessibile per cui l'accento è sulla capacità di permettere la gestione di reti attive locali basate su fonti rinnovabili (smart grid). La rete della mobilità dove l'attenzione è rivolta sia verso il monitoraggio integrato dei flussi e sia verso la mobilità elettrica, non tanto nello sviluppo di nuovi mezzi elettrici, quanto nella definizione e sperimentazione del modello del sistema in cui i mezzi elettrici trovano integrazione in modo da rendere possibile e competitivo il sistema nel suo insieme. La rete degli edifici, intesi non più come

singoli elementi ma inseriti in concetti di reti organizzate con funzioni di telediagnostica e telecontrollo per cui la possibilità di disporre di dati remotizzati in real time aprono la strada a notevoli risparmi energetici ed economici con costi di investimento contenuti essendo fondati principalmente su automazione ed intelligenza. Infine altre reti significative come quella dei rifiuti. Gli obiettivi sono quelli di un minore consumo energetico, maggiore funzionalità, minore costo di gestione grazie ad ICT ed intelligenza.

EERA Smart Cities è organizzato con delle rappresentanze nazionali ognuna delle quali coordina un team di istituzioni nazionali che intendono partecipare ai lavori del programma. ENEA, in qualità di delegato italiano, si è adoperata per la costruzione di un network italiano, composto da molte università e da alcune importanti aziende molto attive sul fronte della ricerca e sviluppo sulla smart city e che contribuiscono con le proprie risorse all'attuazione dei vari sub-programme in cui è articolato il programma.

Nel network europeo ENEA dunque rappresenta una rete italiana di eccellenze di ricerca sulla tematica delle smart city a dimostrazione che la ricerca italiana è ampliamente spendibile, grazie alle proprie capacità e competenze, in ambito internazionale.

Di seguito si riporta la ripartizione dei partecipanti al network per linee di attività. L'attività sulla illuminazione pubblica è in particolare concentrata sul Work Package 2 dove vengono espressamente trattate le "Urban Networks".

Accanto alla partecipazione attiva in EERA l'ENEA ha avuto un ruolo molto significativo nella partecipazione al Joint Programming Initiative Urban Europe. La Joint Programming Initiative (JPI) URBAN EUROPE è una iniziativa di ricerca e di innovazione degli Stati Membri dell'UE e dei paesi associati. E 'stata avviata nel 2010 nel quadro concettuale di programmazione congiunta che è stata proposta dalla Commissione europea e stabilito dal Consiglio dell'Unione Europea nel 2008.

URBAN EUROPE si propone di ripensare e gestire l'orientamento europeo che spinge verso un sempre maggiore incremento e concentrazione delle aree urbane, al fine di creare e sfruttare le sinergie che un'Europa fortemente urbanizzata può offrire sia dal punto di vista economico, sociale, ambientale che dei trasporti al fine di rafforzare la posizione globale dell'Europa stessa.

La Joint Programming Intiative si articola con una organizzazione che prevede un Governing Board (GB) che agisce per conto dell'intera JPI salvaguardano i goals, le mission, l'identità e la coerenza al programma; un Management Board (MB) che è responsabile delle azioni di management e del coordinamento delle attività; un Scientific Advisory Board (SAB) che è un organismo consultivo esterno incaricato per l'offerta di consulenze strategiche che interessano il programma; un Urban Europe Forum (UEF) che è una piattaforma di consulenza formata dai potenziali stakeholders della JPI.

L'attività svolta da ENEA nell'ambito della Joint Programming Initiative Urban Europe è volta a supportare il MIUR nelle attività di Governing Board della JPI, a sviluppare azioni di ricognizione e mappatura delle reti della ricerca nazionali ed internazionali in ambito urbano, a partecipare agli esercizi di foresight internazionali.

Per quanto attiene alle azioni di ricognizione e mappatura è stato creato un data base dei centri di ricerca italiani, politecnici e dipartimenti universitari che hanno svolto attività di ricerca attinenti alle tematiche proposte dalla JPI Urban Europe (ENEA è fortemente presente).

E' stata individuata la struttura della costituenda UERA (Urban Europe Research Alliance) che verrà chiamata ERAUD (European Research Alliance for urban deveopment), sono stati invitati a partecipare agli esercizi di foresight tutti gli Stati Membri (Italia partecipa attraverso ENEA).

UNI, CEI, CIE e CIE-Italia

L'attività ENEA in ambito UNI sono nel GL2, GL5 e GL6. Nel GL2 (Illuminazione di interni) è in corso la revisione della norma UNI-EN 12464-2 (Illuminazione dei luoghi di lavoro. Parte 2. Luoghi di lavoro in esterni). La EN 12464-1 (Illuminazione dei luoghi di lavoro. Parte 1. Luoghi di lavoro in interni) è stata pubblicata nel luglio 2011 ed è in corso la sua traduzione in lingua italiana.
Per il GL5 "Illuminazione stradale (misto Luce e illuminazione/Costruzioni stradali ed opere civili delle irastrutture)" si segnala:

- Entrata in vigore norma UNI 11431:2011 novembre 2011. Luce e illuminazione - Applicazione in ambito stradale dei dispositivi regolatori di flusso luminoso

- Errata Corrige numero : EC 1-2012 UNI 11431:2011 Luce e illuminazione - Applicazione in ambito stradale dei dispositivi regolatori di flusso luminoso - giugno 2012
- Settembre 2012: fine dell'inchiesta pubblica sulla nuova edizione di UNI 11248 "Illuminazione stradale – Selezione categorie illuminotecniche
- In corso i lavori per la stesura norma nuova su Small target visibility: Metodo del contrasto per la valutazione della visibilità di piccoli ostacoli CVO (contrasto vivibilità oggetto)
- Supporto al comitato tecnico CEN/TC 169 "Light and Lighting" per la revisione delle norme EN 1320, documenti elaborati dal sono elaborati dal CEN/TC 169/WG12 insieme al CEN/TC 226 - "Road Lighting":
    - TR 13201-1: Road lighting – Part 1: Selection of lighting classes.
    - EN 13201-2: Road lighting – Part 2: Performance requirements.
    - EN 13201-3: Road lighting – Part 3: Calculation of performance (c'è un draft di aprile 2012).
    - EN 13201-4: Road lighting – Part 4: Methods of measuring the light performance of installations.
    - EN 13201-5: Road lighting – Part 5: Energy efficiency requirements.

Infine, nel GL6 "Illuminazione gallerie" si segnala che in novembre 2011 è entrata in vigore la norma UNI 11095:2011. Titolo : Luce e illuminazione - Illuminazione delle gallerie stradali

In ambito CEI, è stata pubblicata la guida “Efficienza energetica degli impianti di illuminazione”, dedicata agli impianti in esterni, dopo la consultazione pubblica terminata nel febbraio 2012. I lavori proseguono per una “Guida sugli indicatori di efficienza energetica degli impianti di illuminazione di interni”. A queste attività partecipa anche ENEA.

A livello di CIE e CIE Italia, continua la partecipazione ENEA alle attività.

Studio sulla luce dispersa verso l'alto da impianti di illuminazione pubblica [RdS/2012/084 e 085]

In sede CIE verranno proposti i risultati delle prove sperimentali sulla luce dispersa verso l'alto da impianti di illuminazione pubblica di cui è stata completata l'analisi.

Ricordiamo che obiettivi di questa ricerca sono:

- confrontare, a parità di caratteristiche prestazionali, l’impatto ambientale di diverse tipologie di impianti di illuminazione stradale;
- proporre parametri per la classificazione degli impianti riguardo alla luce dispersa verso l’alto (inquinamento luminoso) in base alle loro prestazioni normative e localizzazione sul campo;
- proporre un algoritmo di previsione dell’impatto ambientale di un impianto in base alle caratteristiche quantitative prima definite.

Sono stati utilizzati apparecchi di quattro diverse tipologie:
- con lampada a ioduri metallici e vetro curvo ottimizzato
- con lampada a ioduri metallici e vetro piano
- a LED e vetro curvo ottimizzato
- a LED e vetro piano

La procedura di indagine sperimentale è consistita in:
- caratterizzazione in laboratorio degli apparecchi di illuminazione
- caratterizzazione dell’impianto (limitatamente alle grandezze elettriche di alimentazione e geometriche di installazione)
- calcolo dell’illuminamento e della luminanza del manto stradale
- misurazione dell’illuminamento e della luminanza del manto stradale
- misura dall’alto della luminanza e dell’illuminamento prodotto dall’impianto
- calcolo della ripartizione della luminanza dell’impianto
- individuazione dei contributi dovuti alla radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione, dalla superficie della strada, delle altre zone illuminate
- definizione dei parametri utili al modello matematico per la valutazione dell’inquinamento luminoso.

Le prove si sono svolte in parte a Marcallo con Casone, in parte a Torino presso INRIM: tutti i dettagli teorici e sulla campagna sperimentale sono nei Report di riferimento.

Le misurazioni hanno evidenziato l’elevata complessità del metodo di misura proposto, anche nella fase elaborativa delle misure, ma la sua sostanziale capacità di fornire indicazioni esaustive per la stima dell’inquinamento luminoso, per una sua valutazione quantitativa accurata e per la validazione di modelli

semplificati.

I risultati delle misure stabiliscono un sostanziale vantaggio (riduzione del flusso luminoso diretto verso l'alto a parità di prestazioni illuminotecniche) degli apparecchi a vetro curvo rispetto a quelli a vetro piano e delle sorgenti a LED rispetto a quelle a ioduri metallici.
Inoltre si evidenzia l'elevata criticità nell'allineamento degli apparecchi di illuminazione sia nel contenere l'inquinamento luminoso dovuto alla radiazione diretta sia nel raggiungimento delle prestazioni illuminotecniche richieste per l'impianto. Semplici accorgimenti meccanici nel disegno dell'apparecchio potrebbero facilitare l'allineamento senza complicare eccessivamente le procedure di installazione.
La concentrazione della luce emessa nella superficie utile è un altro parametro importante a parità di prestazioni illuminotecniche, in quanto determina l'efficienza del sistema dal punto di vista prestazioni illuminotecniche / potenza elettrica assorbita. Alte efficienze richiedono la limitazione del flusso luminoso disperso verso il basso su superfici non utili per il raggiungimento delle prestazioni normative (definite solo sul manto stradale e sulle fasce longitudinali adiacenti ai due bordi della carreggiata ed esterne ad essa). Contemporaneamente riducono il contributo per riflessione all'inquinamento luminoso. Richiedono però una maggior attenzione nella scelta da parte del progettista dell'apparecchio e una valutazione delle esigenze e condizioni di illuminazione nelle zone limitrofe all'impianto.
I dati raccolti con le misure dall'alto permettono di calcolare il contributo parziale (radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione) e globale (considerando la riflessione di tutte le superfici illuminate) dell'impianto in condizioni rurali e con qualche approssimazione in condizioni urbane.

Il fattore spettrale di riflessione dei materiali illuminati riveste un ruolo importante considerando la sostanziale differenza nell'emissione spettrale tra le tipiche sorgenti usate in illuminotecnica.
Per simulare l'influenza spettrale è necessario disporre di una serie di dati foto-radiometrici di tipici materiali di rivestimento degli edifici e del manto stradale: su questo aspetto è iniziata a livello CIE una raccolta di dati sugli asfalti maggiormente utilizzati in ambito europeo.

Commissione Europea: Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica

Durante questa annualità i lavori in Commissione Europea sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica per i prodotti di illuminazione sono proseguiti e si sono avute due importanti conclusioni:

- il 12 luglio 2012 è stato adottato dalla Commissione Europea il Regolamento Delegato sull'etichettatura energetica di lampade elettriche e apparecchi. Da quel momento il Parlamento Europeo e il Consiglio avevano 2 mesi per sollevare obiezioni. Non ci sono state obiezioni e la nuova etichetta energetica è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 26 settembre 2012;
- il 13 luglio è stato votato (voto positivo) dal Regulatory Committee, sempre in Commissione Europea, il nuovo Regolamento di Ecodesign su lampade direzionali e lampade LED.

Questi due Regolamenti introducono parecchie novità:

- l'etichetta energetica, che ora è limitata ad alcuni tipi di lampade, viene estesa a tutte le sorgenti, includendo quindi anche le lampade a scarica ad alta intensità, quelle a LED e così via
- è definita anche l'etichetta energetica per gli apparecchi di illuminazione. In realtà questa etichetta non valuta le performances di un apparecchio, ma indica i tipi di lampade che possono essere utilizzate in esso
- il Regolamento di Ecodesign va a completare il quadro dei precedenti Regolamenti, cioè il 244/2009 e il 245/2009 (con i relativi emendamenti), e, anche se si è cercato di uniformare la terminologia usata e i tipi di requisiti, è comunque evidente che ci sono alcune differenze metodologiche, dovute al fatto che dal 2009 ad oggi ci sono state evoluzioni tecnologiche e anche che 3 anni di esperienza sui precedenti Regolamenti hanno fatto scuola.

Sia per la nuova etichetta energetica che per i regolamenti di ecodesign sarà necessaria una attenta azione di informazione, sia per utenti privati che per professionisti e operatori del settore.

Banca dati mercato lampade

E' stata aggiornata a fine anno 2011 la banca dati Nielsen sul mercato delle lampade per uso domestico, che comprende:

- incandescenti "tradizionali"
- incandescenti speciali
- fluorescenti compatte
- fluorescenti circolari
- ad alogeni

Si confermano le tendenze già evidenziate nel precedente PAR, e cioè la progressiva scomparsa delle incandescenti tradizionali e la corrispondente crescita di fluorescenti compatte ed alogene: questo è certamente una diretta conseguenza dei regolamenti della direttiva Ecodesign.

Contemporaneamente il prezzo delle lampade fluorescenti compatte e alogene è in leggera discesa.

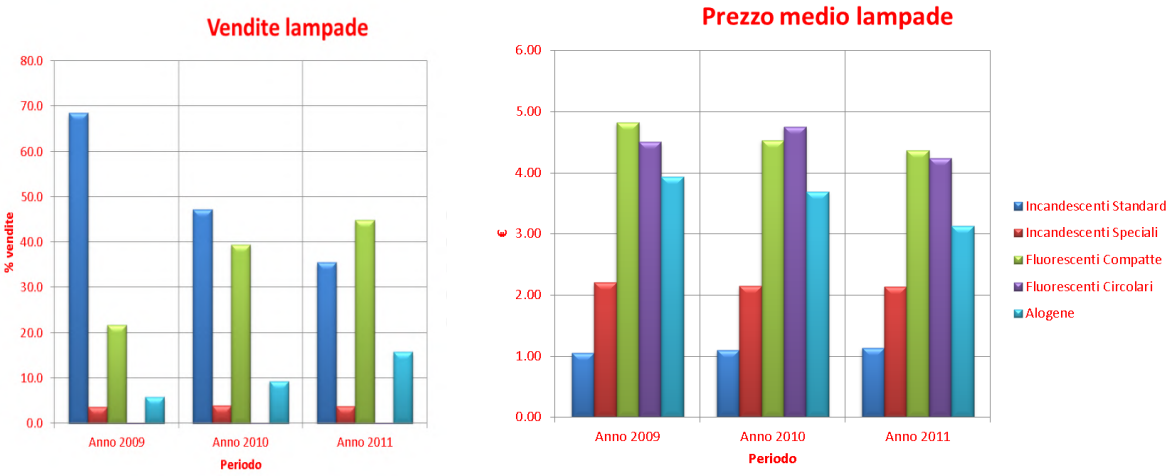


Figura 318. Mercato delle lampade per uso domestico

Sorveglianza di mercato

Un'altra attività è stata l'avvio, in supporto del Ministero dello Sviluppo Economico, della sorveglianza del mercato, così come previsto dalle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica: MSE ha scelto di iniziare proprio con le sorgenti luminose. E' stata definita, insieme con ENEA e UnionCamere, una procedura per la sorveglianza di mercato sull'etichettatura energetica di lampade per illuminazione generale per uso domestico, le classiche lampade "di casa" con attacco E27 o E14, fluorescenti compatte integrate o ad alogeni (le tradizionali a incandescenza escono dal mercato per il Regolamento Ecodesign 244/2009, come si vede bene anche dalle figure sopra). Seguirà l'avvio formale e l'azione vera e propria.

E.2 Sperimentazione territoriale ed assessment dei prodotti del Network Lumière

Lumière è un Progetto sviluppato da ENEA con l'obiettivo di promuovere l'efficienza energetica nel settore dell'illuminazione pubblica al fine di razionalizzarne e ridurne i consumi di energia elettrica e, conseguentemente, contenerne le emissioni di CO_2 in atmosfera.

Dedicato ed indirizzato principalmente ai Comuni italiani, nelle persone dei loro sindaci e pubblici amministratori, punta al miglioramento dell'efficienza energetica, della sostenibilità ambientale e delle prestazioni funzionali ed illuminotecniche degli impianti di pubblica illuminazione, i quali consumi, gestione e stato di fatto, sono spesso rispettivamente, sproporzionati inadeguati ed obsolescenti.

L'attività progettuale, partita dall'analisi del settore e dal coinvolgimento strutturato di tutti i soggetti direttamente ed indirettamente implicati nei processi di gestione del servizio di pubblica illuminazione, è pervenuta alla definizione di quel percorso che, standardizzato e supportato, dovrebbe idealmente garantire una gestione efficiente e sostenibile degli impianti oltre che una corretta programmazione e realizzazione degli interventi volti alla loro riqualificazione.

L'adozione di una metodologia operativa, l'innalzamento del livello di conoscenza e competenza gestionale dell'impianto da parte dei suoi diretti responsabili, lo sviluppo di appositi format operativi e standard di riferimento e la conversione di una rete scollegata di operatori pubblici e privati ed iniziative disgiunte e solitarie in Network strutturati ed operativamente integrati e coordinati, sono stati e sono al tempo stesso, gli strumenti, gli obiettivi ed i principali risultati, rispettivamente sviluppati, perseguiti e conseguiti dal Progetto nel corso della sua realizzazione.

In particolare le attività sviluppate in questa annualità si sono concentrate:

- nel perfezionamento e completamento di quel processo operativo ideale che, denominato come "Un percorso in salita per una bolletta in discesa", dovrebbe costituire una valida guida al miglioramento della

gestione energetica, operativa, illuminotecnica e prestazionale degli impianti di pubblica illuminazione;

- nella sperimentazione e perfezionamento di appositi format e standard operativi, denominati "strumenti di supporto e/o prodotti Lumière" che, strutturati in funzione del processo operativo proposto, dovrebbero promuoverne e facilitarne l'avviamento ed il conseguimento;
- nel completamento e perfezionamento delle Linee Guida quale Manuale di facile consultazione comprendente, in forma semplificata, tutte quelle tematiche che devono essere affrontate e dovrebbero far parte del bagaglio culturale di coloro ai quali è demandata la gestione degli impianti;
- nella diffusione ed assessment di quei "prodotti ed attività" già operativi, sia in forma definitiva sia in forma sperimentale quali: le schede d'illuminazione pubblica base (IP) e impianto significativo (IS), le Linee Guida Economico-Finanziarie, i Workshop, i Convegni, le Manifestazioni e lo sviluppo di proposte progettuali.

L'attività, grazie al confronto diretto con tutti i soggetti che interagiscono nei processi di gestione degli impianti, ha consentito sia di verificare l'efficacia e la validità delle proposte sia di colmarne le lacune e perfezionarne la conformità alle esigenze dei destinatari e degli obiettivi prefissati.

L'impostazione di una "filosofia" di gestione del servizio di pubblica illuminazione, in grado di garantire una "correttezza" procedurale, funzionale ed operativa, a tutela degli interessi di coloro che gli impianti li gestiscono, li riqualificano, li illuminano e li vivono, rappresenta il tentativo e la proposta Lumière per un servizio più efficiente, sostenibile ed innovativo.

I risultati principali:

- 6 workshop di formazione ai quali sono stati invitati 1000 comuni
- Realizzati 21 audit energetici gratuiti ai fini di perfezionare e sperimentare il vecchio modello di audit e proporne quello definitivo
- 10 articoli pubblicati
- Partecipazione a 7 tra manifestazioni ed incontri con i Comuni
- Redazione Linee guida: i fondamentali per una gestione efficiente del servizio di pubblica illuminazione
- Modello di audit energetico
- Studio sulla situazione impianto di circa 200 Comuni utilizzando la scheda illuminazione pubblica base
- Valutazione dei risparmi conseguibili attraverso la riqualificazione e calcolo dei TEE conseguibili su 21 Comuni della Sicilia
- Software di simulazione dei potenziali risparmi energetici conseguibili
- Sviluppo di uno schema semplificato e guidato per la redazione dei PRIC
- Linee Guida per la redazione dei bandi di PI
- Impostazione di Progetti Pilota su Comuni presso i quali intraprendere il percorso.

Per dettagli sull'attività si rimanda ai rapporti:

- RdS/2012/277 Progetto Lumière: un'opportunità per gli enti locali di migliorare il servizio di pubblica illuminazione
- RdS/2012/278 Linee guida: i fondamentali per una gestione efficiente degli impianti di pubblica illuminazione
- RdS/2012/279 Modello di audit energetico Lumiere
- RdS/2012/280 Sviluppo di strumenti di analisi e metodologie procedurali per l'innovazione nell'illuminazione pubblica. il modello di audit energetico
- RdS/2012/281 Proposta di una procedura schematizzata per semplificare la redazione dei Piani Regolatori di Illuminazione Comunale (PRIC)

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Di seguito si riporta un elenco delle collaborazioni attivate nel quadro del progetto.

Università di Milano, Dipartimento di Informatica e Comunicazione: studio di metodi qualitativi e quantitativi per la determinazione dei parametri di qualità visiva relativi alla percezione di colore e contrasto nella scena, con attività sperimentale legata alla resa cromatica, alla percezione e in generale interazione luce – uomo (Obiettivo A, Report RdS/2012/272)

Università di Roma Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica: studio per valutare l'interazione tra luce artificiale ed essere umano e sviluppo di metodologia per la redazione di PRIC, con attività sperimentale sull'interazione luce – uomo (Obiettivi A, Report RdS/2012/273; Obiettivo D, Report RdS/2012/281).

Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze Chimiche: attività sperimentale su OLED, in particolare ricerca su sintesi, deposizione e caratterizzazione di materiali polimerici barriera per acqua e/o ossigeno utilizzabili per l'incapsulamento di dispositivi per l'elettronica organica (Obiettivo B, Report RdS/2012/282).

Politecnico di Milano, Dipartimento InDACO: integrazione dell'apparato sensoriale utile al monitoraggio dell'apparecchio di illuminazione a LED PLUS, attività di definizione dei requisiti e progettazione sperimentale dell'apparecchio di illuminazione PLUS per categorie stradali di tipo ME, attività di misura sperimentale per verifiche prestazionali delle sorgenti LED e delle ottiche utilizzate nella ricerca progettuale (Obiettivo C, Report RdS/2012/274, 275 e 276).

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia: individuazione di metodologie innovative per la diagnostica e controllo degli edifici integrabili in un approccio Smart Village basato sull'utilizzo della infrastruttura della illuminazione esterna come sistema centrale di raccolta dati e distribuzione dei controlli e sul controllo della illuminazione interna e climatizzazione degli edifici (Obiettivo D, Report RdS/2012/229)

Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche: studio e implementazione di possibili strategie di attuazione e controllo al fine di ridurre i consumi dell'edificio con la possibilità di sfruttare il sistema della illuminazione pubblica come rete capillare per la raccolta e l'invio di informazioni verso una rete di edifici (Obiettivo D, Report RdS/2012/054)

Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Informatica e Automazione: 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. La piattaforma ICT è dedicata all'acquisizione, elaborazione e controllo dei dati in ognuno dei moduli per gli applicativi specifici smart installati nello Smart Village (Obiettivo D, Report RdS/2012/230)

Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi: Studio di strutture multifunzionali da installare in ambiente urbano come arredi attivi in una logica di smart cities"; la progettazione di elementi multifunzionali di lighting che integrino altre funzionalità smart è proseguita con uno studio che mira ad ingegnerizzare il lavoro svolto in precedenza (nel PAR 2010) su questo tema e ad estenderlo ad altre componenti urbane (Obiettivo D, Report RdS/2012/283)

Università di Milano – Bicocca, Centro di Ricerca Interuniversitario in Economia del Territorio (CRIET): software per la valutazione approssimativa dei risparmi energetici degli impianti di illuminazione pubblica (per i pubblici amministratori). (Obiettivo E, Report RdS/2012/280)

Agesi e Federesco in qualità di tavoli tecnici e per la collaborazione a tutte le attività del progetto Lumière (obiettivo E)

INRIM e AIDI: analisi finale su campagna sperimentale su luce dispersa verso l'alto da impianti di illuminazione pubblica

Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

L'obiettivo del progetto è lo studio, lo sviluppo e la messa a punto di una serie di dati e strumenti, quali linee guida, benchmarking di consumo energetico negli edifici, modelli di progettazione e programmi di calcolo, per la determinazione e l'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici con particolare riferimento al condizionamento estivo e all'interazione con l'illuminazione, al fine di facilitare il completamento del recepimento della direttiva 91/2002 CE, che prevede, tra l'altro, l'adozione di norme specifiche per il contenimento dei consumi energetici estivi. Le attività hanno considerato anche le indicazioni e gli adempimenti necessari per il recepimento della Direttiva 31/2010/CE Recast, del DLgs 115/08 per l'efficienza energetica nel settore dei servizi energia e del DLgs 28/11 sulle fonti rinnovabili.

In particolare questa nuova Direttiva, che integra la precedente 91/2002/CE, fornisce nuove indicazioni e prescrive nuovi standard per l'efficienza energetica degli edifici, esistenti e nuovi. Le attività di ricerca hanno conseguito i seguenti obiettivi:

- determinazione dei parametri climatici di riferimento su cui basare la normativa;
- sviluppo di una metodologia ed un procedimento di calcolo per l'Indice di Severità del Clima, con riferimento al periodo estivo;
- definizione dei benchmark dei consumi energetici degli edifici per tipologia, destinazione d'uso (edifici commerciali e istituti bancari) e per determinate fasce climatiche;
- definizione di sistemi avanzati di Smart Building per il residenziale;
- sviluppo di linee guida per la progettazione di sistemi a basso consumo di energia nobile da adottare specie per quegli edifici critici dal punto di vista del carico termico estivo;
- sviluppo di metodologie e linee guida per gli edifici di pregio con la stesura di linee guida e schede tecniche di indagine a supporto del decisore politico e del settore professionale;
- sviluppo di linee guida e sistemi di classificazione semplificata dei sistemi di illuminazione avanzati e componenti (semi)trasparenti di involucro in grado di indirizzare il progettista ed il gestore dell'edificio nella scelta dei materiali, delle tecnologie e delle soluzioni più idonee.

In particolare poiché negli edifici non residenziali il consumo per illuminazione artificiale rappresenta il 25% dei consumi elettrici e l'impiego di sistemi di illuminazione artificiale poco efficienti, producendo calore passivo, ha un considerevole carico sui consumi per condizionamento estivo, si sono sviluppati e impiegati strumenti per una corretta progettazione dei sistemi schermanti e artificiali ad alta efficienza ed alta riflettenza, Cool Material.

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Scopo dell'attività è quello di mettere a disposizione del legislatore gli strumenti tecnici (parametri climatici, metodologie di calcolo, tool informatici, parametri caratteristici e linee guida per la progettazione di impianti a bassi consumi energetici) atti a rendere possibile un recepimento molto ampio delle direttive sopra citate per quanto riguarda il contenimento dei consumi energetici per condizionamento estivo degli edifici. L'attività svolta servirà anche come supporto dell'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica di recente emanazione e per il recepimento della direttiva 2010/31/CE sull'efficienza energetica degli edifici, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo e la definizione di edifici di riferimento per il residenziale e non residenziale (scuole, uffici, alberghi, centri commerciali ecc.), lo sviluppo di metodologie di diagnosi energetica e di metodologie di valutazione degli interventi di recupero energetico di edifici pubblici e privati.

Le attività svolte nel quadro del progetto sono state le seguenti:

- completatamento con i dati climatici aggiornati degli anni tipo climatici delle Province italiane;
- predisposizione della revisione della norma UN 10349:1994, che sarà sottoposta all'UNI per la procedura di pubblicazione UNI 10349-3: "Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)";
- supporto dell'applicazione dei decreti sull'efficienza energetica e per l'applicazione del DLgs 115/08 di recepimento della direttiva 2006/32/CE sui servizi energetici, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo di metodologie di diagnosi energetica e di metodologie di valutazione degli interventi di recupero energetico di edifici pubblici;
- completamento del recepimento delle Direttiva 91/2002/e sull'efficienza energetica degli edifici a cui

mancano ancora i decreti attuativi per gli impianti di condizionamento estivo e per quelli di illuminazione, questi ultimi per il settore del non residenziale;

- definizione di sistemi avanzati di Smart Building per il non residenziale per le destinazioni d'uso grandi impianti sportivi;
- sviluppo di una metodologia per la valutazione del parametro costo benefici;
- predisposizione di provvedimenti e nuove misure per il recepimento della Direttiva 31/2010, sull'efficienza energetica degli edifici;
- sviluppo di procedure per la valutazione dell'efficienza energetica negli edifici.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Definizione parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva

Acquisizione e elaborazione dei dati climatici per le Province italiane e aggiornamento della UNI 10349

Questa attività ha raggiunto l'obiettivo della creazione dell'*anno tipo climatico* per le province italiane e l'aggiornamento dei dati climatici della UNI 10349.

La normativa europea in cui è descritto il procedimento per la costruzione dell'*anno tipo climatico* è la EN ISO 15927-4. I dati utilizzati nel calcolo, in accordo con la normativa, sono stati misurati secondo i metodi specificati nella "WMO Guide No. 8".

Nel rapporto completo Report RdS/2012/106 vengono riportati i risultati relativi all'attività di aggiornamento dei dati climatici nazionali e della zonizzazione climatica del territorio ai fini della certificazione energetica degli edifici. Di seguito si illustra in modo sintetico il lavoro svolto.

Allo stadio attuale sono stati completati i lavori relativi alla definizione degli *anni tipo climatici* per tutte le Province del territorio nazionale, in conformità alla UNI EN ISO 15927-4:2005. Sulla base di queste elaborazioni sono stati determinati i valori giornalieri medi mensili delle variabili climatiche: irradiazione solare globale su piano orizzontale, temperatura e pressione parziale di vapore dell'aria. Per mezzo delle relazioni riportate nel testo sono state stimate le componenti dirette e diffuse della radiazione solare globale su piano orizzontale, mentre per la velocità del vento è stata calcolata la media annuale. Tali dati confluiranno nella revisione del progetto di norma prUNI 10349.

Attualmente sono disponibili sia i dati climatici giornalieri medi mensili, da utilizzarsi per valutazioni energetiche degli edifici con codici di calcolo in regime semistazionario (UNI/TS 11300), che i dati orari per codici di calcolo in regime dinamico (EnergyPlus).

In merito alla zonizzazione climatica del territorio nazionale ai fini della certificazione energetica, nella presente ricerca è stata adottata, per il calcolo delle differenze di temperatura cumulate, la metodologia della norma UNI EN ISO 15927-6:2008. Sono stati quindi quantificati e presentati tramite mappe, per ogni comune italiano, i gradi giorno invernali ed estivi determinati assumendo differenti "*temperature base*". Tale calcolo è stato definito a partire dai dati climatici degli anni di riferimento locale.

Per la corretta previsione del fabbisogno energetico del "*sistema fabbricato–impianto*" è necessaria la disponibilità di dati meteorologici adeguati agli attuali modelli di calcolo. Di fatto, al momento, in Italia si fa ricorso a raccolte di dati, quali quelle elaborate dall'ENEL e dal CNR, tra la fine degli anni '70 ed i primi anni '80, alla norma tecnica UNI 10349 del 1994 ed ai profili climatici elaborati dall'ENEA (1999).

Nella normativa tecnica e nei documenti pre-normativi, in aggiunta, vi sono lacune per quanto concerne i dati riguardanti il comportamento termico degli edifici, con particolare attenzione al periodo estivo, nelle varie zone del territorio nazionale e per le varie destinazioni d'uso nei comparti terziario ed abitativo. La carenza maggiore è costituita dall'assenza di dati climatici aggiornati di riferimento per i calcoli, in quanto, a livello nazionale, nessuno fornisce tali informazioni.

In questo quadro il Comitato Termotecnico Italiano Energia e Ambiente (CTI), nell'ambito delle precedenti annualità della Ricerca di Sistema Elettrico (Report RSE/2009/206, RdS/2010/185, RdS/2011/9), ha elaborato gli anni climatici tipo di tutte le Province italiane.

Tali anni climatici sono stati realizzati in conformità alla norma UNI EN ISO 15927-4:2005 «*Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling*». L'anno di riferimento locale consiste in 12 mesi caratteristici selezionati da un database di dati meteorologici realmente misurati di un periodo che dovrebbe essere

preferibilmente ampio almeno 10 anni. Gli archivi, consultabili e scaricabili gratuitamente dal sito CTI, contengono record orari delle variabili meteorologiche: temperatura, irradiazione solare globale su piano orizzontale, umidità relativa e velocità del vento.

La disponibilità di *anni tipo climatici* rappresenta un notevole passo in avanti per la progettazione e la verifica dei sistemi di conversione e utilizzazione dell'energia, sia attivi che passivi, così come nella valutazione energetica del "*sistema fabbricato - impianto*". Opportunamente validati, in conformità alla UNI EN 15265:2008, l'utilizzo di metodi dettagliati di simulazione energetica in regime dinamico, per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, è da ritenersi sempre possibile ed in alcuni casi preferibile a quelli mensili semistazionari. Codici di calcolo complessi di tipo dinamico (EnergyPlus) consentono infatti di valutare l'interazione reciproca di una molteplicità di aspetti (come clima, ombreggiamenti, massa termica e struttura edilizia, ventilazione, funzionamento degli impianti, etc.) sulla prestazione termica ed energetica complessiva dell'edificio, o di singole zone, nelle diverse stagioni.

Si ricorda a proposito che il D.P.R. 59/2009, all'art. 4 "*Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti*", comma 27, ne prescrive già l'utilizzo per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario, che hanno volumetria maggiore di 10.000 m^3.

Sino ad oggi l'archivio di dati climatici più utilizzato per le simulazioni energetiche in regime termico dinamico è stato quello disponibile sul sito di web del Department of Energy (DoE) degli Stati Uniti d'America che riporta anni climatici tipo di 76 località italiane.

Il database di dati climatici aggiornati (presentato nella duplice alternativa di "dato orario" e "dato medio mensile") riveste dunque un'importanza strategica in quanto è un supporto basilare per gli strumenti legislativi con cui il governo vincola cittadini ed operatori ad adottare misure specifiche finalizzate all'incremento dell'efficienza energetica degli edifici.

Gli anni tipo climatici elaborati dal CTI costituiscono la base per l'aggiornamento dei prospetti della norma tecnica nazionale UNI 10349:1994, che riporta dati medi mensili utilizzabili per il progetto e la verifica di impianti di climatizzazione.

In particolare la norma UNI EN ISO 15927-1:2004 specifica le procedure per calcolare e presentare i valori medi mensili dei parametri climatici necessari per valutare alcuni aspetti delle prestazioni termiche e igrometriche degli edifici. La norma tratta le seguenti variabili climatiche: temperatura dell'aria, umidità atmosferica, velocità del vento, precipitazioni, radiazione solare, radiazione ad onda lunga.

I metodi specificati nella norma possono essere utilizzati per calcolare medie mensili di singoli mesi (es. un gennaio di un anno specifico) o di tutti mesi corrispondenti di un insieme di anni (es. tutti i gennai di un periodo di trent'anni).

L'elaborazione degli anni tipo climatici per tutte le Province del territorio nazionale ha permesso di fornire una base di dati climatici armonizzata, ottenuta per tutte le località con medesima procedura (norma UNI EN ISO 15927-4). Nonostante la metodologia di calcolo sia stata la medesima la qualità del prodotto finale è derivata da:

- quantità di dati orari grezzi, disponibili per la costruzione degli anni tipo (generalmente differente da Provincia a Provincia);
- qualità del dato fornito e numero di record orari validi.

Indice di Severità Climatica: classificazione dei comuni italiani ai fini della climatizzazione estiva degli edifici per la definizione delle zone climatiche estive

La definizione di questo indice estivo presenta maggiori difficoltà rispetto al corrispondente indice invernale giacché le variabili climatiche di cui tenere conto sono più numerose e più complesse da valutare

In un precedente lavoro è stata proposta una definizione operativa di questo indice, utile per la classificazione del territorio nazionale in zone climatiche estive e per la determinazione dei valori limite del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva. La definizione proposta comprendeva anche il caso invernale e consentiva quindi una uniformità nella classificazione indipendentemente dal periodo climatico dell'anno.

Nel rapporto tecnico completo [Report RdS/2012/107] viene illustrata la metodologia e l'applicazione del modello matematico dell'indice di Severità Climatica per la classificazione del territorio nazionale per il periodo estivo, e la sua definizione per l'attribuzione dell'ICS ai singoli Comuni. Sono stati sviluppati, sulla base dell'algoritmo definito nei precedenti studi, gli indici di severità climatica per i Comuni italiani prendendo a riferimento i dati climatici contenuti nella norma UNI 10349. Questi indici saranno utilizzati nel decreto in preparazione presso l'MSE, per il

recepimento della Direttiva 31/2010/CE. É confermata la validità del modello matematico proposto per l'indice di severità climatica.

B. Edifici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio, applicabilità di strumenti innovativi per le audit energetiche

L'obiettivo è la definizione degli indici e dei livelli di consumo di edifici ad uso residenziale per diversi servizi energetici quali il riscaldamento, il raffrescamento ed i consumi elettrici, ad integrazione di quanto fatto nelle precedenti annualità in cui si sono definiti gli indici ed i livelli di consumo di edifici con destinazioni d'uso a scuole, alberghi, uffici, grandi magazzini e residenziale. Questo studio ha consentito di poter ampliare il quadro di riferimento e di disporre di dati necessari per la redazione del prossimo PAEE.

L'attività, attraverso studi mirati all'ottimizzazione del sistema edificio-impianto, si pone anche l'obiettivo di fornire al legislatore elementi di valutazione oggettivi in sede di redazione delle norme che implementino le direttive europee, in tema di usi finali dell'energia, quale la 31/2010/CE, ed indirizzino le scelte programmatiche e strategiche per il raggiungimento degli obiettivi sul risparmio energetico e la riduzione delle emissioni dei gas serra.

Il prodotto dell'attività è stato quello di fornire un inquadramento sulla situazione legislativa, in tema di efficienza energetica, a livello europeo e nazionale definire indici e livelli di consumo (benchmark) attuali, e una caratterizzazione del parco edilizio distinti per:

- diversi servizi energetici;
- le varie tipologie edilizie;
- le diverse condizioni climatiche;
- le caratterizzazioni tipologiche e impiantistiche del sistema edificio impianto

Questo consentirà una più puntuale implementazione, a livello nazionale, della normativa europea (tra cui la direttiva 91/2002/CE, 31/20210/CE e della direttiva 32/2006/CE) riguardante le prestazioni energetiche degli edifici e il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio impianto in modo particolare per i consumi elettrici e la valutazione dei livelli di efficienza energetica ottenibili in funzione della fattibilità delle soluzioni tecnologiche.

E' stato redatto anche uno studio finalizzato alla definizione di una metodologia che consente di svolgere analisi energetiche negli edifici alla luce delle normative cogenti e determinare le caratteristiche strutturali ed impiantistiche di "edifici tipo" al fine di condurre una valutazione di fattibilità degli interventi di riqualificazione energetica, in funzione di diverse ipotesi di intervento, sia di tipo strutturale che impiantistico. Questo studio potrà essere utilizzato dal legislatore per determinare azioni e provvedimenti di intervento più significativi per il contenimento dei consumi energetici degli edifici esistenti.

Lo sviluppo di modelli di valutazione del sistema elettrico nazionale, che preveda l'integrazione dei sistemi edificio/impianto, è finalizzata anche alla promozione di azioni per la applicazione di nuove tecnologie per la co-trigenerazione e la generazione distribuita di energia. Dallo studio sono emersi una serie di considerazioni, quali:

- le forti differenze nei consumi, per il periodo invernale e quello estivo, per gli edifici costruiti in diverse zone climatiche (Milano, Roma e Palermo);
- la differenza che si manifesta tra edifici esistenti e quelli costruiti secondo il DLgs 192/05 tale differenza è di circa il 20%;
- la necessità di definire più indicatori per le diverse destinazioni d'uso, per gli alberghi, le scuole e gli uffici l'indicatore potrebbe essere il kWh/m^2;
- l'incidenza molto significativa sui consumi elettrici dovuti agli ausiliari degli impianti e quella dovuta agli impianti di illuminazione;
- per il periodo estivo (raffrescamento), il maggior consumo energetico degli impianti di condizionamento rispetto a quelli per il riscaldamento per le zone B.

Alle attività hanno partecipato il Politecnico di Milano (Dipartimento Energia) che ha eseguito analisi e valutazione dei consumi nell'edilizia bancaria e benchmark mediante codici dinamici, l'Università di Pisa (Dipartimento di Energetica) per la definizione della metodologia di audit energetico, il CRESME per la caratterizzazione e la definizione del parco edilizio per edifici bancari e centri commerciali.

Analisi e valutazioni energetico – ambientali di un edificio-tipo riqualificato secondo il target NZEB

Il presente lavoro è stato impostato sull'ipotesi di riqualificare un edificio rappresentativo del terziario, studiandone gli scenari di possibili interventi di riqualificazione al fine di valutare gli effetti di adeguamento ai requisiti NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) [Report RdS/2012/108]. Nello specifico, l'attività è stata svolta nell'ambito della definizione di criteri e soluzioni di progettazione per edifici ad energia quasi zero.

In base a quanto riportato nel testo della Direttiva 2010/31/UE, un "edificio ad energia quasi zero" è quello con un'altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili. In particolare, la Direttiva stabilisce che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano "edifici a energia quasi zero*"* e che a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano "edifici a energia quasi zero".

Inoltre, la stessa Direttiva prevede che, considerato il lungo ciclo di ristrutturazione degli edifici esistenti, non solo gli edifici di nuova costruzione, ma anche gli edifici esistenti che subiscono una "ristrutturazione importante" dovrebbero essere assoggettati a requisiti minimi di prestazione energetica.

Considerato che il parco edifici esistente è responsabile del 40% del consumo globale di energia nell'Unione e che è sulla riqualificazione dell'esistente che il settore delle costruzioni è ormai da tempo prevalentemente rivolto, il presente studio ha voluto affrontare il tema del target NZEB in caso di retrofit.

L'edificio scelto come caso di studio è tra quelli costituenti il Campus Città Studi del Politecnico di Milano. Le diverse ipotesi di retrofit lato involucro e impianti, che implementerebbero la prevista manutenzione straordinaria del rivestimento delle facciate, sono state considerate in termini di energia, di costi e di emissioni ad effetto serra.

Gli esiti dello studio dimostrano che, dal punto di vista delle prestazioni energetico-ambientali, intervenendo sull'esistente con soluzioni tecnologiche diffuse e consolidate è possibile ridurre i fabbisogni di energia primaria (e le emissioni ad effetto serra associate) nell'ordine del 40% rispetto a quelli attuali e che ricorrendo a fonti di energia rinnovabile prodotta in loco (in questo caso tramite un sistema fotovoltaico) il bilancio può attestare un consumo energetico prossimo allo zero.

Le analisi condotte dal punto di vista economico hanno però evidenziato delle criticità connesse all'implementazione di alcune soluzioni: per l'edificio esaminato, la sostituzione delle finestre, l'aumento dei livelli di isolamento dell'involucro edilizio oltre gli standard attuali e l'installazione dell'impianto di ventilazione con recupero termico non sarebbero economicamente vantaggiose. L'International Energy Agency, infatti, ha di recente avviato programmi dedicati a concertare le metodologie di ottimizzazione degli interventi in funzione dei costi a livello internazionale e alcune assunzioni procedurali in corso di definizione nell'ambito dell'Annex 56 "Cost Effective Energy and GHG Optimization in Building Renovation" sono state recepite nello svolgere il presente studio. Tra queste, il riferimento all'analisi dell'Embodied Energy e GHG delle soluzioni di retrofit: le valutazioni LCA, condotte sugli interventi previsti per migliorare le prestazioni isolanti dell'involucro dell'edificio in esame, hanno rivelato impatti non trascurabili, fino ad attestare dispendi energetici (ed emissioni di gas serra) ammortizzabili, con i risparmi ottenibili in fase di gestione, in oltre 60 anni di vita utile post-intervento.

Da un lato, dunque, i possibili sviluppi della ricerca auspicherebbero una partecipazione attiva ai lavori dell'Annex 56 della IEA, per approfondire il tema dell'ottimizzazione delle strategie di retrofit di concerto con gli approcci in corso di definizione a livello internazionale.

Dall'altro lato, e per la Ricerca del Sistema Elettrico Nazionale più in generale, potrebbe essere di grande interesse condurre elaborazioni di benchmark reali, a partire dai dati di consumo elettrico registrati in un parco edifici del terziario consistente quale è quello del Politecnico di Milano.

Presso il Politecnico di Milano, infatti, è stato avviato a inizio dell'anno corrente un programma di monitoraggio dei consumi elettrici per i 57 corpi di fabbrica costituenti l'Ateneo (incluso quello oggetto del presente studio): il software di lettura e archiviazione dei dati è attualmente in fase di beta-testing e, con gli interventi correttivi in atto, a fine anno disporremo di una lettura affidabile dei dati di consumo in tempo reale e dello storico del primo anno di archiviazione per tutti gli edifici d'Ateneo (si potranno anche calibrare con maggior dettaglio i risultati dell'indagine svolta in questo studio).

Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto" caratterizzazione del parco immobiliare ad uso residenziale

Nello studio si analizza il parco immobiliare del settore del residenziale svolgendo un'analisi finalizzata a caratterizzare i servizi energetici degli edifici per definirne lo stato di fatto e caratterizzarli anche per l'uso di

apparecchi elettrici [Report RdS/2012/109].

Più del 60% degli edifici esistenti in Italia ha più di quarant'anni. Nelle città capoluogo di provincia, fra soli dieci anni, 4/5 delle abitazioni saranno in edifici costruiti più di quarant'anni fa. Nelle quattordici città metropolitane esse saranno l'85%.

Lo stock edilizio è formato da un consistente numero di edifici costruiti prima della seconda guerra mondiale (il 30,1% degli edifici) per una quota meno evidente di unità abitative (il 22% delle abitazioni) con un numero di alloggi per edificio pari a solo 1,9. Dal dopoguerra fino a tutti gli anni '90 l'edificato abitativo italiano si è espanso enormemente (il 70% degli edifici e il 78% delle abitazioni si riferisce a tale periodo) con un incremento del numero medio di alloggi per edificio che resta relativamente basso (2,7). Solo l'ultimo ciclo immobiliare (post 2001) evidenzia una concentrazione più elevata su edifici di dimensioni più elevate (il 4,5% degli edifici e il 9.2% delle abitazioni è stato costruito dopo il 2001) raggiungendo le 5,2 abitazioni per edificio.

Se si riflette sul ciclo di vita del prodotto edilizio, queste percentuali assumono una rilevanza ancora maggiore. L'aspettativa di vita media delle componenti di un edificio è infatti pari a circa 61 anni: si tratta di un esercizio statistico (ovviamente teorico) basato sulle prospettive di mantenimento delle proprie funzioni prestazionali degli elementi fabbricativi nell'edilizia.

E' evidente, pertanto, che il patrimonio edilizio italiano si trova in uno stato di "obsolescenza", sia nei termini della sicurezza che delle prestazioni, anche energetiche. C'è da considerare che la riqualificazione per l'efficienza energetica nell'edilizia sconta forti ritardi ma anche grandi potenzialità e che nonostante la sensibilità crescente da parte degli utenti finali degli immobili, nonostante l'ampliamento della gamma di prodotti "sostenibili" per l'edilizia, nonostante i provvedimenti di incentivazione, ad oggi non sono stati raggiunti obiettivi soddisfacenti nell'efficientamento energetico degli edifici. Se da un lato la realizzazione di impianti di fonti rinnovabili si incrementa considerevolmente di anno in anno, sia pure ad un costo elevato, d'altro lato le nostre case sono oggetto troppo sporadico di interventi per ridurre i consumi. E pertanto, rispetto agli impegni di Kyoto, l'Italia sembra essere sulla buona strada per il conseguimento dell'obiettivo della crescita della produzione di energia da fonti rinnovabili ma è in forte ritardo per gli altri due obiettivi: il contenimento del consumo di energia e delle emissioni di "gas serra".

Ed è proprio in relazione alle carenze e, soprattutto alle potenzialità nel patrimonio edilizio esistente, agli ostacoli e alle possibili modalità di superamento, che va posta una particolare attenzione in questa fase che vede avanzare sensibilmente il business degli impianti di energia rinnovabile e i vincoli energetici per la nuova edificazione, ma che vede risorse evidentemente insufficienti (non solo e non tanto economiche, ma anche di idee e di proposte) nell'efficienza energetica del già costruito.

L'indagine effettuata, finalizzata alla "stratificazione" del patrimonio immobiliare abitativo (per epoche, modalità costruttive, comportamenti degli utenti, territori, ecc.) restituisce, in un prodotto squisitamente statistico, le condizioni di tale stock.

Nel 2011 sono esistenti sul territorio nazionale oltre 30 milioni di abitazioni, di cui oltre il 31% è concentrato nelle prime 10 province (le Roma, Milano, Torino, Napoli, Bari, Palermo, Brescia, Bergamo, Catania e Genova) e ben il 20% nelle sole prime quattro province. Il 50% si distribuisce nelle prime 23 province. Gli edifici risultano circa 11.762.700 e si distribuiscono sul territorio in misura relativamente meno concentrata in considerazione del fatto che nelle province con maggior numero di abitazioni sono presenti edifici di maggiori dimensioni.

Negli ultimi 10 anni, il flusso medio annuo di abitazioni di nuova realizzazione è pari a circa l'1% dell'esistente. A livello nazionale la quota maggiore di abitazioni è inserita in edifici plurifamiliari con almeno 5 alloggi (47%), ma una quota di poco inferiore, pari al 40% è assorbita da edifici di piccole dimensioni (mono e bi familiari); le piccole palazzine di tre o quattro alloggi assorbono il rimanente 13%. Le caratterizzazioni territoriali appaiono già rilevanti a livello di ripartizione geografica poiché il Nord-Ovest è distinto da una forte presenza di edifici plurifamiliari (ben il 56% contro il 52% del Centro, il 45% del Nord-Est, il 42% del Sud e solo il 33% delle Isole). Quasi specularmente inversa la distribuzione di edifici mono e bi familiari (il 55% nelle Isole, il 46% nel Sud, il 41% nel Nord-Est, il 35% nel Centro e il 32% nel Nord-Ovest). La quota di alloggi in edifici di dimensioni intermedie (tre o quattro alloggi, identificabile spesso nella piccola palazzina o nella tipologia di "case affiancate") risulta relativamente stabile sul territorio con valori compresi tra l'11% e il 14%.

Nel rapporto completo sono presentate la distribuzione degli edifici per epoca di costruzione per regione, i consumi di energia elettrica, la consistenza del parco residenziale per Provincia, la definizione di edifici tipo per area geografica e le caratteristiche delle tipologie più frequenti, le utilizzazioni tipologiche e sono caratterizzate e apparecchiature alimentazione elettrica.

Nell'appendice statistica sono presentate nel dettaglio i dati relativi alle dotazioni di involucri di impianto di consumo e valutazioni sugli interventi di riqualificazione effettuati e la percentuale ancora da effettuare.

Sviluppo di un software applicativo per l'audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario

Con tale attività, svolta in collaborazione con Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi (DESE) dell'Università di Pisa, si è voluta definire una metodologia di riferimento per la diagnosi energetica degli edifici, in conformità del D.lgs. 115/08 e del D.lgs. 192/05 e s.m.i. per gli edifici ad uso residenziale e terziario, mirata al contenimento degli usi finali di energia elettrica e termica. Nel rapporto tecnico RdS/2012/110 sono descritte nel dettaglio le procedure che consentono di:

- rilevare i parametri significativi del sistema edificio-impianto;
- acquisire e analizzare i dati storici di fatturazione energetica;
- valutare i contratti di fornitura dell'energia;
- calcolare i fabbisogni e gli utilizzi di energia primaria per gli impianti elettrici, l'illuminazione, il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, il trattamento dell'aria;
- calcolare l'energia prodotta da fonti rinnovabili (fotovoltaico, solare termico, biomasse);
- individuare i sottosistemi in cui le energie disperse sono maggiori;
- individuare le migliori modalità di conduzione e gestione dell'edificio;
- valutare, da un punto di vista tecnico-economico, gli interventi di retrofit energetico;
- valutare l'opportunità di impiego di metodi più accurati per stimare i flussi energetici (campagne di misure e monitoraggio, simulazioni dinamiche del sistema).

Le procedure di calcolo sono corredate da tabelle e schede tecniche di riferimento, che hanno lo scopo di facilitare il lavoro del professionista che dovrà svolgere l'audit, e rimandano alle normative tecniche del settore in vigore in Italia e in Europa.

L'obiettivo finale del lavoro è colmare un vuoto normativo in materia di diagnosi energetica e favorire soprattutto le Pubbliche Amministrazioni che promuovono tali iniziative e non hanno a disposizione uno strumento metodologico di riferimento per una chiara definizione delle procedure che i tecnici competenti dovrebbero seguire. Si distinguono per l'applicazione dell'audit energetico due fasi.

Nella prima fase, dopo aver definito cosa si debba intendere per diagnosi energetica, le operazioni da svolgere le sue finalità e l'obiettivo finale si descrivono le procedure ed i parametri da considerare; si riportano due schemi di sintesi dove sono illustrati i principali flussi energetici di un edificio e l'applicazione della metodologia.

L'esito della diagnosi energetica consente, in conclusione, di valutare il fabbisogno caratteristico del sistema edifico-impianto e di individuare degli indicatori specifici di richiesta di energia primaria (kWh/m^2 o kWh/m^3), rappresentativi della prestazione energetica dell'edificio.

Eventuali differenze emerse dal confronto degli indicatori con quelli "reali" ricavati dalle fatturazioni energetiche consentono di valutare l'accuratezza delle ipotesi assunte, eventuali disfunzioni riscontrabili nell'effettivo esercizio degli impianti installati, nonché una gestione non ottimale da parte dell'utenza. Dato che il calcolo energetico è svolto rispetto ad un anno meteorologico "statistico", i dati di fatturazione, ove possibile, andrebbero "normalizzati" e resi indipendenti dagli anni climatici a cui si riferiscono. Per la normalizzazione si possono utilizzare indici di severità climatica riferiti agli anni di fatturazione, ad esempio i Gradi Giorno invernali e i Gradi Giorno estivi basati sulla temperatura sole-aria. Se lo storico è sufficientemente lungo, l'operazione di media delle fatturazioni tra i vari anni disponibili può essere sufficiente ad annullare gli effetti di stagioni particolarmente calde o fredde. In definitiva, il confronto può portare alla validazione del procedimento o alla sua revisione, con l'introduzione di analisi aggiuntive.

Nella seconda fase della diagnosi sono stati individuati e valutati gli interventi per migliorare le prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto.

Una volta verificata la possibilità di poter ottenere una diminuzione sostanziale dei fabbisogni energetici dell'edificio, si procede alla simulazione degli interventi, ipotizzandone la realizzazione a livello di involucro, di impianti termici, di impianto di illuminazione, di impianti di produzione da fonti rinnovabili. Sono da valutare non solo le singole azioni, ma anche possibili interventi integrati su più sistemi, in modo da evidenziare eventuali conflitti o sinergie (ad esempio, ottenere una sostanziale diminuzione del fabbisogno di energia termica dell'involucro senza contemporaneamente prevedere la sostituzione del generatore di calore può portare quest'ultimo a lavorare costantemente a fattori di carico troppo bassi e dunque inefficienti).

Nella relazione finale di diagnosi energetica saranno descritti dall'auditor soltanto i possibili interventi di riqualificazione energetica del sistema edificio-impianto di cui sia stata accertata la fattibilità tecnica (incluso il rispetto dei vincoli paesaggistici, ambientali, architettonici, archeologici) ed economica. I principali indicatori economici d'investimento che è possibile utilizzare in queste valutazioni sono:

- VAN (valore attuale netto);

- IP (indice di profitto);
- TIR (tasso interno di rendimento) o IRR (*internal rate of return*);
- TRA (tempo di ritorno attualizzato);
- TR (tempo di ritorno semplice) o SP (*simple payback time*).

La determinazione del valore dei flussi energetici deve essere effettuata preferibilmente sulla base dei dati e delle informazioni ricavabili dalla documentazione disponibile, dalle interviste all'utenza e nella fase di sopralluogo, prestando comunque attenzione a salvaguardare l'economicità in termini di tempo e risorse delle operazioni di diagnosi. Qualora alcuni dati non fossero disponibili o se la loro rilevazione risultasse troppo impegnativa, si possono utilizzare le procedure semplificate e i valori pre-calcolati forniti dalle normative e citati nel rapporto. In particolare l'impegno di maggiori risorse da parte dell'auditor va concentrato nei sottosistemi e nelle zone termiche più energivore.

Per verificare il funzionamento del software sviluppato (SEAS, Software Energetico per Audit Semplificati) e la correttezza delle formule inserite e delle metodologie adottate, sono stati effettuati le diagnosi energetiche di due edifici con destinazioni d'uso residenziale e terziario. Il software si è dimostrato idoneo a stimare con sufficiente accuratezza i flussi energetici termici ed elettrici degli edifici presi in esame nei due casi studio.

Analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor

Uno degli obiettivi che la Comunità europea sta perseguendo negli ultimi decenni è la riduzione dell'energia utilizzata nel settore delle costruzioni, nello specifico attraverso la direttiva 2002/91/CE e le sue successive modifiche e integrazioni. A seguito del sempre maggior uso di dispositivi di condizionamento meccanico, l'energia usata per il raffrescamento sta assumendo una percentuale crescente all'interno del bilancio energetico del settore edifici. Pertanto, uno dei temi attuali è la garanzia di comfort termico durante il periodo estivo a fronte di un basso consumo energetico o addirittura senza utilizzare energia attraverso sistemi attivi.

Uno degli strumenti a supporto di questo obiettivo è costituito dalla norma UNI EN 15251 che fornisce riferimenti per il comfort termico, luminoso e qualità dell'aria. Per quanto riguarda il comfort termico la norma utilizza due modelli, quello di Fanger, da usarsi in presenza di raffrescamento meccanico, e il modello di comfort Adattivo, dedicato invece agli edifici sprovvisti di un impianto di raffrescamento meccanico. In particolare, la tale norma europea suggerisce al progettista di ottimizzare l'orientamento dell'edificio e la progettazione delle finestre, delle schermature solari e delle caratteristiche termiche di un edificio facendo riferimento prima ai limiti di comfort proposti insieme al modello di comfort Adattivo e ove non si riesca a soddisfare tali requisiti e si ricorra all'installazione di sistemi meccanici per i raffrescamento si deve fare riferimento al modello di comfort di Fanger.

Per agevolare il lavoro dei progettisti la norma ha anche suggerito alcuni metodi che permettono di sintetizzare in un unico valore (indicatore di discomfort di lungo periodo) la prestazione di comfort termico di un edificio integrata su un periodo esteso. Con riferimento agli indicatori di discomfort di lungo periodo, la frase della UNI EN 15251 può essere esplicitata in una procedura di ottimizzazione che permette di individuare i parametri dell'edificio che minimizzano un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul modello adattivo e se non si riesce a mantenere il discomfort termico entro i limiti previsti dalla norma, a fronte dell'installazione di un impianto di raffrescamento meccanico, si passa al modello di comfort di Fanger e si procede con l'individuazione di quei parametri dell'edificio che minimizzano un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul modello di Fanger.

Per i fini del presente lavoro [RdS/2012/115+, si è ricorso agli indici proposti dalla norma europea EN 15251 nell'allegato F. Focalizzandosi esclusivamente sul periodo estivo, tali indici di valutazione di lungo periodo delle condizioni di comfort termico sono stati usati per valutare 54 differenti varianti di un ampio edificio per uffici di riferimento. L'edificio è composto da cinque piani fuori terra, caratterizzato da un volume occupato di 32.706 m^3 e da una superficie esterna di 8.501 m^2, quindi con un rapporto di forma (S/V) di 0,26 m^{-1}. Il rapporto tra la superficie finestrata e le facciate verticali è del 40%. Il piano tipo, che si ripete per ogni piano, è stato suddiviso in cinque zone termiche. Esso è stato usato per tutti i cinque piani e tutto l'edificio composto da venticinque zone termiche è stato simulato per tener conto delle differenze nelle condizioni di comfort tra le zone ai piani superiori e al piano terra.

Sotto un profilo progettuale, l'analisi condotta ha permesso di identificare i parametri progettuali che maggiormente influenzano la valutazione del discomfort termico. In particolare si è individuato che la ventilazione naturale notturna è il parametro che maggiormente influenza le condizioni termiche dell'edificio e quindi ha il maggiore impatto sul comfort termico e un'efficace protezione solare delle superfici trasparenti aumenta sempre il comfort durante il periodo estivo anche se il suo potenziale è minore di quello della ventilazione notturna

(almeno nei climi individuati in questo lavoro e relativamente alle tipologie edilizie considerate, in cui il rapporto superfici vetrate/superfici opache non è particolarmente elevato).

L'aumento dell'isolamento termico e la diminuzione della permeabilità all'aria dell'involucro può ridurre in estate il comfort interno, ma solo se le superfici vetrate non sono opportunamente schermate e se non è implementata una strategia di ventilazione notturna adeguata. In generale evacuare i carichi termici estivi attraverso le pareti (e quindi peggiorarne il comportamento invernale) appare come una strategia errata se questi carichi possono essere controllati con le protezioni solari e smaltiti efficacemente con la ventilazione notturna, con vantaggi dal punto di vista energetico e di comfort.

L'aumento della massa termica dà benefici in tutti i contesti climatici analizzati, con un beneficio marginale che si riduce all'aumentare della massa oltre certi valori.

C. Sviluppo e sperimentazione di tecnologie e sistemi integrati intelligenti, per il controllo e la gestione dell'energia negli edifici del settore civile

Nel settore del civile, residenziale e non residenziale, la domanda di energia è in crescita, soprattutto per quanto investe il settore elettrico. Molto sentita è l'esigenza poter disporre di studi e ricerche per migliorare l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto, utilizzando sistemi di Smart Building, tecnologie e materiali per edifici a basso consumo e sistemi integrati da fonte rinnovabile. Negli ultimi anni diverse attività si sono focalizzate sullo studio e sviluppo di questi sistemi, ma con approcci poco integrati nel sistema edificio impianto. La ricerca ha evidenziato la fattibilità dell'utilizzo di questi sistemi negli edifici e la convenienza tecnico-economica che tali applicazioni possono dare, evidenziando i casi e le tipologie di impianto più o meno convenienti in relazione alla destinazione d'uso e alla tipologia di sistema applicato.

Le attività prevedono lo sviluppo, applicazione e la valutazione di tecnologie, sistemi, componenti e dispositivi per il controllo, la gestione e la regolazione intelligente degli impianti (Smart Building) per minimizzare i consumi energetici negli edifici integrando a sistema gli impianti di illuminazione, di climatizzazione invernale e estiva integrati anche con nuovi sistemi a pompe di calore ad assorbimento, di climatizzazione assistiti da calore solare, sistemi innovativi di illuminazione efficiente, applicazioni di tecnologie informatiche per la razionalizzazione dei consumi energetici ed il controllo ambientale che potranno trovare applicazione in un complesso urbano significativo.

Sulla base delle attività realizzate nel corso delle precedenti annualità del programma, si è sviluppata una ricerca di approfondimento nel settore del civile, grandi complessi sportivi, mirato a strutturare meglio le attività di diagnosi e benchmarking degli edifici e strutture del settore, tenendo presenti le nuove indicazioni che provengono dalla UE in riferimento agli edifici a consumo quasi zero e allo sviluppo di metodi e tecnologie per la Smart City.

Definizione degli indici di consumo energetici, elettrici e termici, e indicazioni di soluzioni tecnologiche da adottare per ridurre i consumi energetici per grandi complessi sportivi

Lo studio [Report RdS/2012/111] è focalizzato sulla valutazione dei consumi energetici, elettrici e termici, di un grande centro sportivo analizzando gli impianti e le destinazioni d'uso dei singoli complessi del centro e definendone i profili di utenza con la finalità di individuare soluzioni per il miglioramento dell'efficienza energetica.

Il Centro sportivo Giulio Onesti dell'Acqua Acetosa in Roma (zona climatica D), di proprietà di CONI Servizi, è stato scelto come caso studio di un complesso pubblico, per la dimensione, l'articolazione delle destinazioni d'uso, le diverse tipologie edilizie, le tecnologie impiantistiche nonché per l'elevata qualità di gestione e manutenzione degli impianti. Un caso molto significativo data la volontà dell'Ente gestore di migliorare e di mantenere impianti e sistemi diminuendo al massimo l'impatto ambientale on le relative ricadute economiche.

La ricerca è ha analizzato il complesso individuando le possibili migliorie apportabili al sistema al fin di:

- aumentare l'efficienza energetica del sistema edificio/impianto,
- ridurre al massimo le dispersioni di energia e l'impatto ambientale,
- ridurre le spese delle manutenzioni ordinarie elettriche e meccaniche,
- ottimizzare i costi di investimento impiantistici connessi con le continue manutenzioni e ristrutturazioni,
- delineare le strategie per i futuri interventi di risparmi energetico,
- aumentare l'affidabilità e la continuità di esercizio del sistema,
- iniziare gli studi per la redazione di una linea guida sull'ottimizzazione dei centri sportivi che possa avere una valenza a carattere nazionale.

L'impianto sportivo polifunzionale "Giulio Onesti" si presenta oggi, in termini di dimensioni e volumi, con una estensione complessiva di 220.000 m^2 e di un volume edificato di 122.000 m^3. Il volume complessivo riscaldato è pari a circa 94.500 m^3 ed il volume complessivo condizionato è di circa 46.000 m^3. Gli edifici vengono climatizzati con diverse logiche, facendo riferimento a necessità e tempi differenti.

Per quanto riguarda le diverse tipologie di ambienti/servizi analizzati, questi sono stati suddivisi in funzione delle relative diversità di involucro edilizio, tipo di servizio, necessità energetiche ed efficienza.

Il centro è dotato di quattro cabine elettriche di trasformazione che operano a tensioni concatenate 8400-380 V. La consegna da ACEA avviene nella cabina A, che è anche cabina di trasformazione, e poi distribuita alle altre tre cabine del centro. Tutte le cabine sono dotate di due trasformatori da 630 kVA in parallelo, tranne la cabina CTF, dedicata alla centrale termica, che ne ha uno solo.

Da pochi anni è stata costruita ed attivata una centrale termo frigorifera CTF unica che è in grado di soddisfare circa l'80% del fabbisogno termico del centro sportivo, sia caldo che freddo. I fabbricati piccoli e distanti non allacciati al CTF rimangono serviti da sistemi locali in quanto, per piccole potenze e brevi utilizzi, non conviene costruire lunghe condutture aumentando le perdite. La centrale CTF è dotata di tre caldaie a gas e di due pompe di calore reversibili con recupero del calore di desurriscaldamento e condensazione durante il funzionamento estivo; il calore è recuperato tramite il circuito chiamato "Desurriscaldatore".

Sono stati presi in esame e analizzati i consumi energetici, elettrici e termici, delle singole zone di cui è composto il centro. Di seguito si riportano le zone analizzate.

Campi sportivi aperti: la valutazione dei consumi delle aree all'aperto, intese come zone di transito, parcheggi e prati, ha considerato principalmente l'illuminazione degli spazi esterni, dove si utilizzano esclusivamente energia elettrica dedicata a lampade di diverso tipo ma con livello globale di illuminamento sufficientemente basso e, pertanto, confrontabili tra loro. L'illuminamento richiesto è abbastanza elevato, le torri-faro impiegano un elevato numero di proiettori di grande potenza ed il consumo pesa una quota importante sull'assorbimento elettrico. I campi sportivi all'aperto utilizzano esclusivamente energia elettrica dedicata a lampade, ad alogenuri, sodio o mercurio, installate sulle torri faro ai bordi dei campi stessi.

Foresterie: erano servite da una caldaia a gas metano che provvedeva contemporaneamente alla produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento. L'acqua calda sanitaria viene oggi realizzata mediante scambiatore sulla tubazione del riscaldamento proveniente dalla centrale termica CTF; per separare detti consumi è necessario risalire ai dati (dettagliati per mese) degli anni 2008 e 2009 che fanno riferimento alla caldaia a gas locale. La valutazione dei consumi delle foresterie ha tenuto conto principalmente dei seguenti utilizzi dell'energia:

- acqua calda sanitaria,
- illuminazione di interni,
- forza motrice,
- raffrescamento,
- riscaldamento

Mense: la valutazione dei consumi delle mense si è rivelata abbastanza complessa in quanto comprende molteplici utilizzi dell'energia, quali:

- acqua calda sanitaria,
- cucina a GAS
- illuminazione di interni,
- forza motrice,
- riscaldamento,
- raffrescamento.

La mensa fornisce circa 350 pasti al giorno, vale a dire circa 105.000 pasti per anno di esercizio. Il dato viene preso in considerazione nella valutazione degli indicatori al fine di valutare i consumi in funzione dell'effettivo utilizzo della mensa e non degli spazi.

Palestre: la valutazione dei consumi delle palestre di notevole altezza è complessa e include un forte dispendio di energia a causa dei grandi volumi contenuti; i principali motivi per cui aumentano i consumi sono legati alla necessità di maggiore illuminazione e di riscaldare un grande volume distribuito su una notevole altezza (circa 8-12 m). Le necessità energetiche sono legate ai seguenti assorbimenti:

- illuminazione di campi sportivi interni,
- raffrescamento,
- riscaldamento,
- ventilazione.

Palestre basse: la valutazione dei consumi delle palestre di modesta altezza, entro i 5m, non sono gravate da un forte dispendio di energia per illuminazione e riscaldamento; queste vengono trattate quasi come dei normali ambienti interni. Le necessità energetiche sono comunque legate a tutti i seguenti assorbimenti:

- illuminazione di interni,
- raffrescamento,
- riscaldamento,
- ventilazione

Piscine: la valutazione dei consumi delle piscine va approfondita su diversi temi data la complessità di impianto ed i numerosi utilizzi dell'energia. Le piscine dimostrano la necessità di fornire i servizi di seguito riportati:

- riscaldamento dell'acqua della vasca durante il rinnovo continuo,
- riscaldamento dell'acqua della vasca durante il riempimento,
- riscaldamento degli ambienti,
- illuminazione di campi interni,
- pompe,
- ventilazione.

Le suddette necessità vengono analizzate e descritte separatamente a meno del riscaldamento dell'acqua della vasca che include il riscaldamento in fase di riempimento a quello in fase di normale ricambio in esercizio.

Spogliatoi: la valutazione dei consumi degli spogliatori risulta anch'essa complessa per la diversità di servizi energivori necessari, di seguito riportati. Gli spogliatori dimostrano la necessità di alimentare i seguenti servizi:

- acqua calda sanitaria,
- illuminazione di interni,
- forza motrice,
- riscaldamento,
- ventilazione.

Le suddette necessità vengono analizzate separatamente nel rapporto RdS/2012/111.

Uffici: la valutazione dei consumi degli spazi ad uso ufficio è legata ai seguenti utilizzi finali dell'energia:

- illuminazione di interni,
- forza motrice,
- raffrescamento,
- riscaldamento e ACS.

Le analisi e le valutazioni riportate per le singole zone e destinazione d'uso hanno portato alla definizione di specifici indicatori di consumo e fanno riferimento all'energia effettivamente assorbita dai carichi e, pertanto, non includono le perdite del sistema di trasformazione/alimentazione. Gli indicatori sono stati calcolati per ogni tipo di sport/attività e per ogni tipologia di servizio/energia.:

In sintesi i risultati dell'attività sono stati i seguenti:

- è stata effettuata una ampia indagine sul centro sportivo Giulio Onesti, verificando le tipologie di impianto, gli schemi, il funzionamento, lo stato di mantenimento e l'efficienza;
- è stata realizzata una campagna di misura degli assorbimenti energetici elettrici e termici per un intero anno di attività; i dati sono stati ricavati dai contabilizzatori, ove disponibili, e calcolati sula base di indagini e misure ove non disponibili;
- sono stati calcolati gli indicatori di consumo suddivisi per ogni attività e per ogni diversa tipologia di sistema assorbitore e energia, riportati nel capitolo dedicato;
- si è rilevata la convenienza energetica delle seguenti scelte:
    - disporre di un competente staff tecnico addetto a supervisione, manutenzione ed ottimizzazione degli impianti,
    - dismettere i piccoli impianti di riscaldamento per passare ad una centrale unica con distribuzione del calore,
    - operare i recuperi di calore ove possibile, mediante installazione di scambiatori e delle necessarie opere impiantistiche,
    - installare sistemi di supervisione e contabilizzazione dell'energia in tutte le sue forme;

- si è data una descrizione completa ed esaustiva del comportamento energetico di un grande centro sportivo che può essere sfruttata a fini di ricerca ed ottimizzazione dei luoghi adibiti allo sport in genere; il lavoro in oggetto risulta un buon inizio per raggiungere un accurato modello di previsione di consumo per i grandi impianti sportivi;
- sono stati delineati, anche grazie ai tecnici dell'ufficio tecnico del CONI SERVIZI, gli studi maggiormente utili sulla valutazione numerica accurata del risparmio energetico che potrebbero essere approfonditi in futuro.

D. Efficienza energetica in edifici di pregio architettonico con destinazione non residenziale/aree archeologiche di proprietà pubblica

L'efficienza energetica in edifici di pregio architettonico è un tema che risulta essere ancora poco indagato ed è un tema molto sentito dagli operatori del settore. Dal punto di vista energetico prestazionale necessita di indagini e studi che possano caratterizzare il parco degli edifici e definirne il potenziale di risparmio. Questo è stato il presupposto per cui nella precedente annualità si era promossa una linea che indagasse questo settore. Da considerare che il quadro normativo attuale, sull'efficienza energetica, non prevede per questi edifici particolari prescrizioni, ma il decreto, in fase di preparazione per il recepimento della Direttiva 31/2010/CE, comporterà per questi edifici prescrizioni di efficienza energetica per la parte impiantistica.

Nella precedente annualità della RdS le attività hanno prodotto la definizione di un complesso di edifici di pregio su cui sviluppare metodologie per la gestione, la manutenzione dei beni e l'applicazione sistemi e tecnologie integrate con le fonti rinnovabili. Come sito era stato individuato il complesso del Parco di Villa Reale a Monza che, tra l'altro, fa parte del circuito interessato dall'EXPO 2015 di Milano. La ricerca aveva prodotto delle schede tecniche per l'individuazione e la valutazione di interventi in grado di garantire, al contempo, il miglioramento energetico e la salvaguardia dei caratteri morfologici, materici e architettonici degli edifici di pregio , le linee guida per la gestione e manutenzione dei beni ed un rapporto per la determinazione delle tecnologie da applicare, in particolare PdC geotermiche, solare fotovoltaico, minidraulica e sistemi di Smart Building.

Le attività hanno avuto delle criticità in merito agli studi per la fattibilità di applicazioni di tecnologie e impianti, integrate con le fonti rinnovabili per l'efficienza energetica. Le ragioni principali di questa situazione ricadono in alcune criticità che si sono manifestate nello svolgimento delle attività. In particolare si segnalano le procedure burocratico - amministrative che non hanno dato, al costituente Parco di Villa Reale, il trasferimento dei beni da parte della Regione Lombardia e del Amministrazione di Monza, il che ha comportato difficoltà operative per i monitoraggi, le analisi e le indagini necessarie per la definizione degli interventi previsti per gli edifici. Per cui, nonostante l'interessamento del MIBAC e gli sforzi prodotti dal Direttore del Parco di Monza e dall'ENEA, non si sono potuti rimuovere ostacoli e impedimenti incontrati e si è ritenuto pertanto opportuno non proseguire le attività dell'obiettivo.

E. Impatto e mitigazione del clima urbano per la riduzione dei consumi elettrici ed il miglioramento del comfort termico negli edifici

Procedura di esposizione in esterno; caratterizzazione del comportamento radiativo nel tempo di materiali per l'involucro edilizio

La linea di attività è stata incentrata sullo studio di materiali ad elevata riflessione solare, approfondendo due tematiche:

- la determinazione e le potenzialità di materiali riflettenti al fine di ridurre le temperature a scala urbana;
- analizzare e sviluppare metodologie di predizione del decadimento delle proprietà radiative dei materiali da costruzione per effetto dello sporcamento e dell'invecchiamento una volta in opera.

Di seguito si presentano i risultati più significativi conseguiti durante l'annualità [Report RdS/2012/227], che pongono, allo stesso tempo, le basi per gli sviluppi futuri, da intraprendere durante le prossime fasi dell'Accordo di Programma.

Misure in campo, eseguite nella città di Roma, hanno evidenziato l'entità del fenomeno dell'isola di calore urbana. I dati di temperatura sono stati acquisiti da centraline termo-igrometriche posizionate in diverse zone centrali della città e all'interno del Centro Ricerche ENEA Casaccia. Quest'ultimo sito è stato scelto come il riferimento rurale. Il valore massimo dell'intensità di isola di calore registrata ha raggiunto i 7 °C e si è presentata durante la

fase notturna in un quartiere densamente urbanizzato nel centro cittadino. Questo valore risulta allineato con i valori presenti in altri studi effettuati su altri agglomerati urbani.

Le pavimentazioni stradali rappresentano una porzione significativa dell'impronta urbana e sono dunque rilevanti nell'incremento delle temperature urbane, a causa dell'elevato assorbimento solare dei materiali tipicamente utilizzati. Sono state dunque condotte una serie di analisi per valutare le prestazioni di nuovi materiali, in particolare, sono state condotte analisi spettrofotometriche su tinte per asfalti al fine di valutarne le proprietà di riflessione

La Tabella 65 presenta i valori integrati nei relativi spettri (visibile, infrarosso vicino e solare) degli asfalti tradizionali e delle tinte per asfalto.

Tabella 65. Valori integrati di riflettanza delle tinte per asfalti secondo la norma ISO 9050 2003

Tinte Asfalti	ρ_e (%)	ρ_{NIR} (%)	ρ_v (%)
Asfalto Nuovo	4,5	6,7	2,9
Asfalto	16,3	19,5	14,2
Bianco Sporco "Cool"	65,7	65,9	68,9
Grigio "Cool"	40,3	41,0	41,9
Blu "Cool"	25,3	34,2	17,6
Verde "Cool"	36,2	45,7	29,8
Rosso "Cool"	27,9	39,1	13,9

Le curve spettrali ricavate dalle misurazioni sono state integrate secondo la norma ISO 9050, ottenendo i valori di riflettanza solare, nell'infrarosso vicino e nella banda del visibile.

Le misurazioni mostrano che le tinte per asfalto colorate hanno una maggiore riflettanza solare rispetto agli asfalti convenzionali, caratteristica principale per mantenere la superficie fredda sotto la radiazione solare. L'asfalto nuovo ha una riflettanza nettamente inferiore rispetto all'asfalto "datato" in tutto lo spettro solare: nella gamma del visibile il colore nettamente più scuro del primo determina una riflettanza luminosa quasi 5 volte inferiore rispetto al secondo. Anche la riflettanza nell'infrarosso vicino e solare sono decisamente inferiori, rispettivamente di 3 e 4 volte circa.

È interessante notare che i colori bianco sporco e grigio non presentano significative proprietà selettive, come si evince dai valori in tabella 1: i valori di riflettanza nell'infrarosso vicino e nel visibile sono praticamente gli stessi per i due materiali. La stessa situazione non si verifica per i campioni colorati, per i quali si registra sempre un aumento della riflettanza nell'infrarosso vicino rispetto a quella nel visibile. La differenza di riflettanza tra le bande del N.I.R. e visibile varia tra 16% (verde) e 25% (rosso), in termini relativi, ciò significa che la riflettanza nell'infrarosso vicino è superiore alla riflettanza luminosa da 1,5 a 3 volte. La differenza tra la riflettanza nell'infrarosso vicino e quella solare è, ovviamente, inferiore e varia tra il 9% (blu) e 11% (rosso).

Piccole porzioni di asfalto di una strada del Centro Ricerche ENEA sono state trattate con le tinte "cool" analizzate precedentemente, per verificare i profili termici di questi materiali innovativi rispetto agli asfalti convenzionali. La temperatura superficiale di questi materiali è stata continuamente monitorata durante l'estate 2011 (dal 11 Agosto al 30 Agosto). Anche se questo lasso di tempo non corrisponde al periodo più intenso in termini di irraggiamento solare, il monitoraggio è stato attuato per controllare la risposta dei materiali in condizioni reali. I risultati ottenuti con termo-resistenze sono riassunti in Figura 319 che mostra la distribuzione cumulativa della differenza tra la temperatura della superficie dell'asfalto convenzionale e di quelli "cool".

Secondo i risultati, tutti i campioni sono stati più freddi dell'asfalto durante l'intero periodo, escludendo rare eccezioni durante la notte. I risultati più interessanti si riferiscono al bianco sporco, che è rimasto più freddo di almeno 5 °C per il 55% del periodo e di 10 °C per 37%. La tinta grigia è stata più fredda dell'asfalto convenzionale di 2,5 °C per metà del periodo e di 7,5 °C durante il 7% del tempo. Il verde e il blu hanno fatto registrare temperature superficiali inferiori di 5 °C rispettivamente per il 24 e per il 15% del periodo. I risultati peggiori sono stati quelli del campione rosso che non ha mai raggiunto differenze di temperatura superiori a 5 °C.

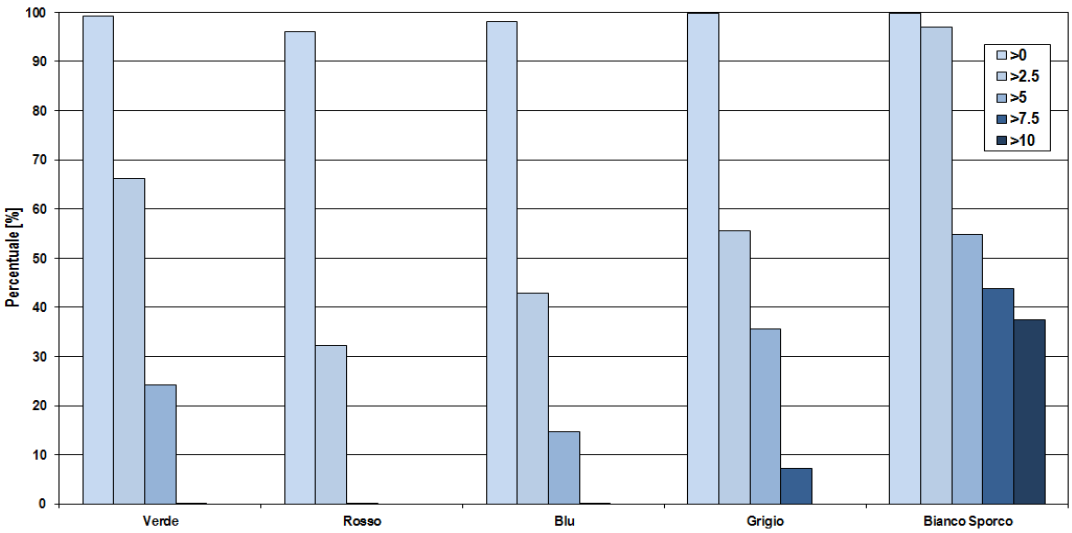


Figura 319. Distribuzione cumulativa percentuale nel periodo 11-31 Agosto delle differenze di temperatura tra asfalto convenzionale e "cool"

L'impatto che i rivestimenti di asfalto "cool" possono avere sulla temperatura esterna in una zona urbana è stato studiato successivamente con ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico chiamato SVAT (Soil, Vegetation and Atmosphere Transfer). Questo strumento opera su micro-scala ed è in grado di simulare l'evoluzione temporale di diversi parametri termo-fluido-dinamici all'interno di una griglia tridimensionale. Mediante questa griglia è possibile ricreare la porzione di un'area urbana con edifici e strade, oltre a modificare le proprietà termiche e ottiche di elementi quali la temperatura all'interno di edifici, la trasmittanza termica e la riflettanza delle superfici. Il quartiere scelto è una porzione del quartiere Prati, una zona densamente urbanizzata di circa 580.000 m^2 nel centro di Roma. Questa zona è stata immessa all'interno dello strumento ENVI-met allo scopo di ricreare la distribuzione tridimensionale di strutture, pavimentazione stradale e vegetazione. Sono state eseguite tre simulazioni durante una giornata estiva, il 20 luglio, con tre diverse configurazioni di riflettanza solare per asfalti: 10% per simulare un asfalto convenzionale, 40% e 65% per simulare rispettivamente un asfalto grigio "cool" e bianco sporco "cool".

Confrontando i risultati delle tre simulazioni caratterizzate da diversi valori di riflettanza solare dell'asfalto per una distribuzione orizzontale della temperatura su un piano a 3 metri dal livello del suolo e durante il picco di temperatura alle ore 15:00, la temperatura dell'aria diminuisce in media di circa 3 °C passando da un tessuto urbano composto da asfalti convenzionali a uno in cui l'area è stata simulata con un'applicazione di asfalto grigio "cool". Considerando l'applicazione di un asfalto bianco sporco "cool", la temperatura diminuisce ulteriormente, con una differenza media di 5,5 °C.

Ciò è dovuto al fatto che la superficie dell'asfalto "cool", a causa della sua elevata riflettanza solare, rimane più fredda se sottoposta a radiazione solare rispetto a quella di un convenzionale asfalto scuro, come precedentemente verificato in via sperimentale. Una superficie più fredda determina un trasferimento di calore convettivo e radiativo inferiore all'aria dell' ambiente urbano e di conseguenza la temperatura di quest'ultima tende a raggiungere valori inferiori.

Tramite il software ENVI-met sono stati ricavati anche dei profili verticali di temperatura sempre nell'ora di picco di quest'ultima e per le tre configurazioni di riflettanza. Sono stati scelti due punti, il primo dei quali in prossimità di vegetazione, il secondo lontano da essa, presso un incrocio stradale. La temperatura è stata calcolata da un'altezza da 0 a 58,5 metri.

Le tendenze della temperatura per le tre configurazioni sono state molto simili e la differenza di temperatura è rimasta pressoché costante in relazione all'altezza. Questo risultato è un'ulteriore dimostrazione di quanto gli asfalti "cool" possano influenzare in modo netto e radicale le condizioni termiche della zona considerata, migliorando il comfort anche ad altezze significative al di sopra del livello stradale, ben oltre l'altezza media degli edifici. E' stato notato un diverso comportamento dei due recettori tra 0 e 25 metri dovuto a piante e alberi ad alto fusto che modificano il profilo di temperatura del recettore 1 (vicino alla vegetazione). La differenza massima è di 1 °C a 4,5 m di altezza. Oltre il limite di 25 m le due tendenze di temperatura si sovrappongono perché il recettore 1 non è più influenzato dagli effetti della vegetazione.

I profili della temperatura urbana ottenuti con le simulazioni precedenti sono stati, infine, utilizzati per calcolare il carico di raffrescamento di picco di un'abitazione tipica inserita nel contesto di riferimento. Lo scopo dello studio è stato la valutazione dell' influenza che un'applicazione di asfalti ad alta riflettanza solare può avere sui carichi di picco di raffrescamento. Lo studio è stato condotto con il software TRNSYS (Transient System Simulation Tool) sviluppato dalla University of Wisconsin Madison.

L'edificio considerato è una palazzina che si articola su quattro piani, ognuno dei quali è composto da due appartamenti con una superficie in pianta netta di circa 150 m^2. Sono stati simulati due livelli di isolamento, ognuno dei quali è stato inserito in un contesto urbano caratterizzato dalle tre configurazioni di riflettanza dell'asfalto.

Sono state registrate riduzioni sensibili della domanda di raffrescamento di picco dovute all'uso di questi rivestimenti stradali: 18,9% per le configurazioni non isolate e 14,6% per l'edificio isolato. Questi risultati assumono una connotazione più importante se estesi a tutta la stagione estiva.

In conclusione, l'utilizzo esteso di questa tecnologia innovativa combinato con un aumento delle aree verdi potrebbe portare a una sensibile riduzione dell'effetto isola di calore urbana e delle sue conseguenze con miglioramenti sui livelli di comfort e con una diminuzione degli usi energetici legati al raffrescamento negli edifici. Gli sviluppi futuri riguardano essenzialmente:

- metodi accurati di valutazione delle proprietà radiative di cool materials per asfalti e applicazioni edilizie, con misure goniofotometriche;
- valutazione delle applicazioni a scala urbana con strumenti complessi di termo-fluidodinamica;
- applicazioni di cool material per altri elementi dell'involucro edilizio.

Procedura di invecchiamento e sporcamento accelerato per climi italiani per la valutazione della propensione al mantenimento nel tempo delle prestazioni ottico-radiative dei materiali per l'involucro **edilizio** [Report RdS/2012/113 e 114]

È stata condotta un'analisi della letteratura scientifica che ha messo in evidenza come lo sporcamento di coperture aventi alta riflettanza possa comportare una sensibile riduzione del risparmio conseguito con l'utilizzo di cool material (per gli anni successivi al primo anno di installazione si è osservata una riduzione addirittura del 20%). Anche se esistono efficaci tecniche per ripristinare la riflettanza iniziale, interventi di pulizia della copertura non sono economicamente sostenibili al solo fine del risparmio energetico. Si è visto che la causa principale che causa il decremento di riflettanza di cool material sono i depositi carboniosi dovuti a prodotti della combustione presenti nel particolato atmosferico.

Esistono anche dei database dell'Environmental Protection Agency statunitense e del Cool Roofing Rating Council (CRRC) di prodotti soggetti a esposizione naturale in ambiente esterno non urbano e dei quali è stata valutata la riflettanza solare ogni tre mesi per un periodo non inferiore a tre anni. Tuttavia, sono relativi solo a tre campi di esposizione negli USA: uno in clima temperato e ambiente inquinato sub-urbano (in Ohio), uno in ambiente caldo secco extra-urbano (in Arizona), uno in ambiente caldo umido extra-urbano (in Florida).

In generale, per tutti i prodotti per copertura testati dal CRRC, si vede che i prodotti aventi riflettanza solare iniziale minore di 0,20 tendono ad aumentare la propria riflettanza nel tempo, mentre, per i prodotti con riflettanza iniziale maggiore di 0,50, maggiore è la riflettanza, maggiore è il decremento dopo tre anni di esposizione, con una maggiore dispersione dei risultati; ciò significa che l'influenza delle caratteristiche del prodotto (es.: rugosità superficiale, porosità aperta, proprietà elettriche che influenzano l'adesione di particolato, etc.) cresce al crescere della riflettanza (quando questa è superiore a circa 0,50). Per quanto concerne l'emissività termica, sempre nel database del CRRC, per circa il 90% dei prodotti testati, si osservano variazioni inferiori al 5% rispetto al valore iniziale (dopo tre anni di invecchiamento naturale).

E' stata poi condotta un'analisi relativa alle procedure di esposizione naturale e i metodi invecchiamento e sporcamento accelerato, prendendo in considerazione procedure standardizzate e non.

Per quanto concerne le procedure di esposizione naturale, alcuni aspetti, tuttavia, appaiono non completamente armonizzati (quindi irrisolti). In tutte le norme nazionali o internazionali analizzate viene chiaramente indicato che:

- ambienti di esposizione fortemente inquinati dovrebbero essere evitati;
- il tipo e l'albedo del terreno di posa dei telai influisce sulle condizioni di esposizione;
- i risultati dell'esposizione naturale dipendono del periodo dell'anno in cui sono esposti;
- le condizioni climatiche dovrebbero essere monitorate e registrate.

Tuttavia queste indicazioni spesso non sono osservate e sono state riscontrate discrepanze fra le diverse norme. Inoltre, per molti prodotti da costruzione, l'inclinazione d'impiego è molto differente dalle condizioni di esposizione indicate in normativa e utilizzate per l'invecchiamento naturale (le norme suggeriscono di esporre campioni inclinati di 5°, 45°, e 90° rivolti verso l'equatore).

Nessun metodo di prova normato per d'invecchiamento accelerato fornisce una correlazione fra numero di anni e numero di cicli d'invecchiamento accelerato, ma esprime il degrado come misura delle prestazioni residue o come confronto con i provini invecchiati in esterno.

Attualmente esiste solo un metodo di prova accelerato che accoppia sporcamento e riproduzione degli agenti atmosferici, e riproduce la deposizione di sporco considerando un procedimento, simile alla sabbiatura, durante il quale le polveri vengono accelerate con un ventilatore e fatte incidere contro i provini (JSTM J 7602, disponibile solo in giapponese). Esiste anche un metodo di prova in fase sperimentale, sviluppato al LBNL che combina il ciclo d'invecchiamento della ASTM G 154 con lo spruzzamento di una sospensione di particolato atmosferico sui campioni.

Il metodo sviluppato al LBNL - è confrontato con i risultati di un anno e sei mesi di esposizione naturale presso i tre siti del CRRC. La maggior parte dei metodi di prova per l'invecchiamento accelerato prevede la combinazione dell'irraggiamento UV in sequenza con pioggia o condensazione, oppure della radiazione solare (con lampada allo Xenon) e pioggia, mentre non vi sono metodi di prova normati che includano nei cicli di gelo-disgelo. In aggiunta, secondo quasi la totalità dei metodi normati che prevedono cicli d'invecchiamento accelerato, prodotti diversi sono esposti ad alte temperature, indipendentemente dalle proprietà ottico - radiative del prodotto considerato. Questo comporta, per i metodi di prova che sollecitano ad alte temperature durante l'irraggiamento UV, condizioni termiche molto simili per materiali aventi riflettanza solare molto diverse.

Sono stati selezionati 16 prodotti per coperture di cui 14 membrane impermeabilizzanti e 2 tegole tipo olandese. Per ogni materiale è stato selezionato un prodotto avente proprietà "standard", ossia rappresentativo delle proprietà dei prodotti già presenti in commercio, e una o più alternative aventi prestazioni ottimizzate, cioè ad alta riflettanza (cool materials) o con proprietà fotocatalitiche. Fra le membrane sono state selezionate membrane sintetiche poliolefiniche (TPO), poliolefiniche a base polipropilenica (TPO/FPA), in polivinilcloruro (PVC), bituminose con armatura polimerica e rivestite con un coating elastomerico da applicarsi in opera, bituminose con armatura polimerica e rivestite con graniglia.

I prodotti sono stati selezionati cercando di includere nel programma di esposizione materiali aventi diverse finiture superficiali (più o meno rugosi) e soprattutto diverse riflettanze solari al tempo zero, comprese fra 0,237 e 0.868. Tre campioni per ogni prodotto selezionato sono stati esposti in area urbana a Milano (presso il Politecnico di Milano) e a Roma (presso la sede dell' ENEA). Tutte le membrane impermeabilizzanti sono state esposte debolmente inclinate (con pendenza pari a circa 2°) sia a Milano sia a Roma, mentre solo a Milano sono state in aggiunta esposte inclinate di 45° rivolte a Sud. Le tegole invece sono state esposte sia a Milano che a Roma inclinate del 30% rivolte a Nord e a Sud. Per ogni prodotto, sito e condizione di esposizione, sono stati esposti tre campioni, dei quali, al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale, è stata caratterizzata la riflettanza spettrale con uno spettroriflettometro UV-VIS-NIR e sono stati calcolati i valori di riflettanza solare, nel campo UV, visibile e del vicino infrarosso secondo la norma ISO 9050. L'esposizione ha avuto inizio contemporaneo a Roma e Milano il 18 aprile 2012.

Per quanto concerne la riflettanza solare, si osservano decrementi marcati già dopo i primi tre mesi di esposizione per i prodotti maggiormente riflettenti, ad esempio una membrana bianca in poliolefina ha una riflettanza iniziale pari a 0,838 e dopo tre mesi ha una riflettanza pari a 0,711 esposta a Roma, e pari a circa 0,700 per i campioni esposti a Milano. Per alcuni materiali la riflettanza dopo i primi mesi di esposizione è maggiore a Roma che a Milano (prodotti n° 1, 2, 4, 5, 6, e 15), mentre in altri casi accade l'opposto (prodotti n° 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, e 16).

Per tutti i prodotti esposti, si osservano i maggiori decrementi di riflettanza nel campo della radiazione visibile (fra 380 e 780 nm), mentre nel campo del vicino infrarosso (fra 780 e 2500 nm) si osservano, in media, variazioni significative, anche se meno pronunciate. Per la maggior parte dei prodotti presi in considerazione si ha un decremento, rispetto alla riflettanza iniziale, maggiore del 5%, e per i prodotti aventi maggiore riflettanza iniziale maggiore di 0,70 il decremento nei primi tre mesi di esposizione, supera nettamente il 10% (la mediana è il 14,1%, con un massimo del 18,9%). In generale, si osserva come i prodotti avente maggiore riflettanza solare iniziale sono quelli che presentano i maggiori decrementi di riflettanza solare dopo tre mesi di esposizione.

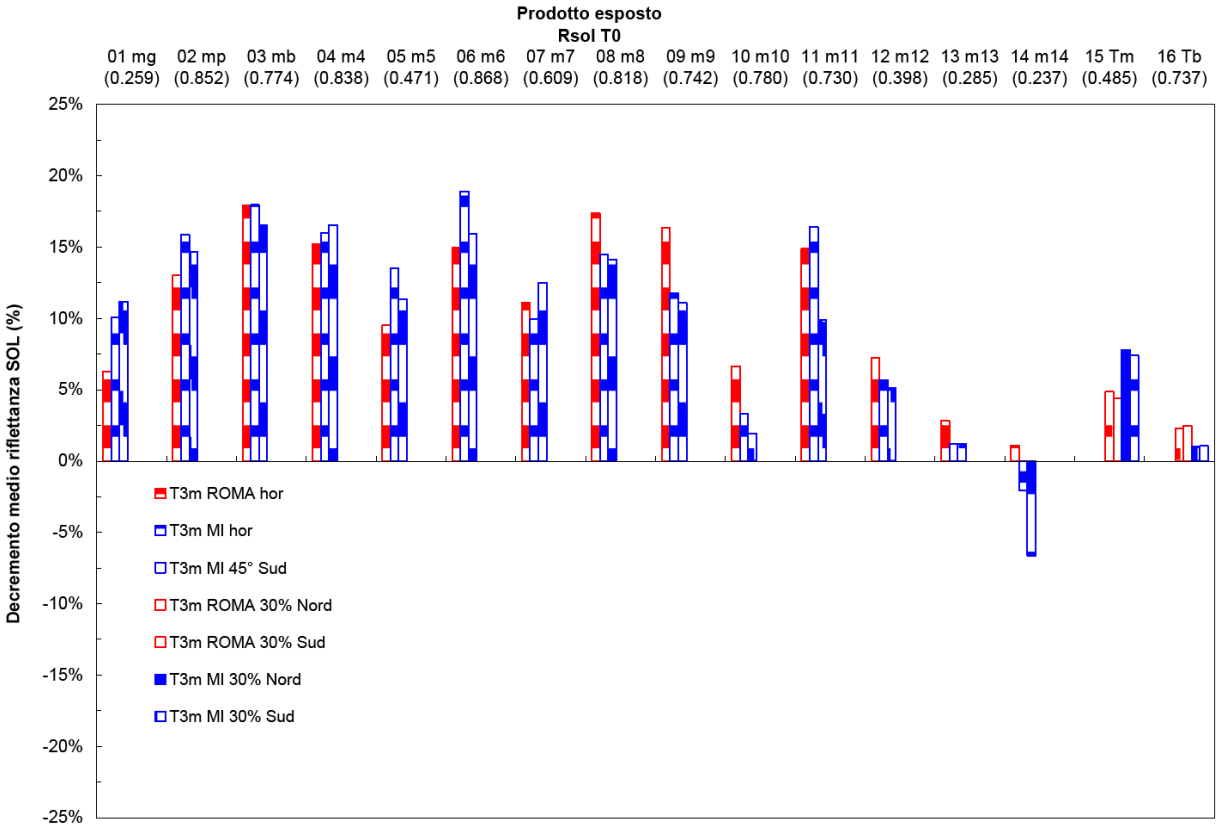


Figura 320. Decrementi percentuali medi di riflettanza solare per tutti i prodotti (da 1 a 14 membrane, 15 e 16 tegole) al tempo zero e dopo tre mesi di esposizione naturale a Roma e Milano

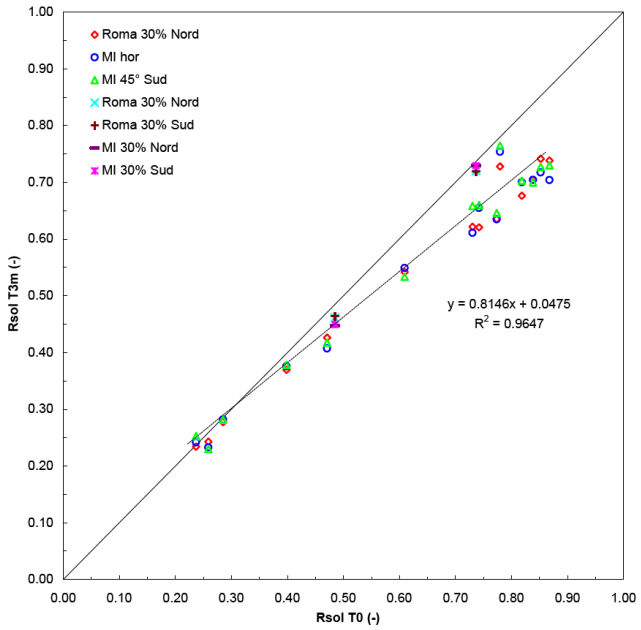


Figura 321. Riflettanza solare dopo tre mesi rispetto al valore iniziale

È stata condotta, inoltre una prima campagna esplorativa di prove d'invecchiamento e sporcamento accelerato presso LBNL. La procedura di prova prevede una prima fase di condizionamento di otto ore d'irraggiamento UV e otto ore di condensazione, seguita da una fase di sporcamento accelerato durante il quale un mix, di polvere, sali, sostanze organiche e particolato atmosferico, viene nebulizzato sui campioni, poi asciugati con una lampada all'infrarosso, e un'ultima fase, uguale alla prima, d'invecchiamento climatico. Il mix che viene nebulizzato sui campioni riproduce una media dei depositi atmosferici che vengono osservati presso i tre campi di esposizione del

CRRC (Arizona, Ohio, e Florida). Prima e dopo l'esposizione accelerata i campioni vengono caratterizzati, misurandone la riflettanza spettrale con uno spettrofotometro UV-VIS-NIR.

I primi campioni esposti all'invecchiamento e sporcamento accelerato sono stati delle malte fibrorinforzate a superficie rugosa, ottenuta mediante sabbiatura, di colore bianco (cicli d'invecchiamento e sporcamento accelerato su campioni degli stessi prodotti per coperture testati nel programma di esposizione naturale oggetto di questo studio sono in fase di svolgimento). Campioni degli stessi prodotti sono stati esposti a Milano a partire dal 18 ottobre 2011, rivolti a Sud e a Nord, in verticale e in verticale sottosquadro, schermati dalla pioggia. Confrontando i dati dell'esposizione naturale (dopo sei mesi d'invecchiamento naturale) e dell'esposizione accelerata si osservano valori simili di decremento relativo di riflettanza solare (dell'1,5% con l'esposizione accelerata, ed in media del 2% con l'esposizione naturale, anche se il decremento è di quasi il 5% per l'esposizione a Nord non schermata). Si osservano, invece, differenze in merito alla forma degli spettri dei campioni invecchiati naturalmente e in maniera accelerata.

Per quanto attiene gli sviluppi futuri, si individuano le seguenti linee:

- la misura della riflettanza dei campioni esposti in ambiente esterno, per almeno 3 anni;
- prove di invecchiamento e sporcamento accelerato sui prodotti per coperture oggetto di questo studio (queste prove sono in corso di svolgimento);
- ulteriori test accelerati, utilizzando il mix che riproduce le condizioni di sporcamento presso il sito dell'Ohio (che è un sito suburbano, e si avvicina maggiormente alle condizioni di inquinamento delle città italiane);
- una specializzazione del mix per lo sporcamento accelerato rappresentativa dei contesti urbani italiani.

Determinazione delle proprietà termofisiche di cool material per applicazioni a scala urbana: limiti e potenzialità [Report RdS/2012/227]

La densità urbana e la progettazione di ambienti costruiti e naturali delle città svolgono un ruolo cruciale nella definizione di modelli sostenibili. Dal momento che si prevede che oltre l'80% della popolazione UE vivrà in aree urbane entro il 2030, è importante esaminare con attenzione strategie energetiche, ambientali e di salute pubblica a livello urbano. I cambiamenti climatici e, in particolare, il riscaldamento globale mettono in evidenzia le conseguenze dell'espansione urbana incontrollata: le temperature ambientali aumentano e le ondate di calore si fanno più frequenti con una durata superiore.

Un effetto tipico di questa nuova condizione è il fenomeno dell'isola di calore urbana, ossia l'aumento della temperatura dell'aria in ambienti urbani rispetto alle zone rurali circostanti, caratterizzate da profili di temperatura dell'aria più freschi. La causa principale dell'isola di calore urbana è la modifica della superficie terrestre nella zona urbana in cui la vegetazione viene sostituita da superfici edificate (di solito strade lastricate ed edifici), caratterizzate da elevato assorbimento solare oltre ad impermeabilità e proprietà termiche elevate che incrementano l'accumulo di energia e il rilascio di calore. L'aumento della temperatura dell'aria è determinato anche da attività antropiche: scarico dei trasporti pubblici e privati, scarico dei sistemi di riscaldamento degli edifici e calore dissipato dai sistemi di condizionamento d'aria. Un gran numero di studi effettuati a diverse latitudini confermano l'esistenza del fenomeno: sono state misurate intensità di isola di calore urbana fino a 12 °C e sono state condotte diverse indagini in aree urbane in tutto il mondo che mostrano come durante una giornata l'effetto isola di calore urbana vari tra 2 °C e 6 °C.

L'effetto ha un forte impatto sul comportamento termico degli edifici: la domanda di energia e di picco negli edifici dotati di impianto di raffrescamento aumenta in modo significativo. Ne consegue un aumento dei costi, in particolare a causa del consumo di energia elettrica durante le ore di picco dei caldi pomeriggi estivi. Infine le tecniche di raffrescamento passivo diventano meno efficienti perché le temperature notturne elevate non permettono un favorevole scambio termico tra aria e strutture edilizie. Il fenomeno è rilevante se si considera che il settore edilizio rappresenta circa il 40% del consumo energetico complessivo ed è causa del 36% delle emissioni di CO_2 in Europa, con una tendenza in continuo aumento. Da ciò si evince che l'isola di calore urbana non comporta solo rischi energetici: discomfort termico e problemi di salute sono più intensi durante le ondate di calore; le temperature più elevate creano le condizioni favorevoli per la formazione di smog; l'emissione di gas serra aumenta a causa dell'aumento del consumo di energia elettrica.

Come detto in precedenza le superfici costruite sono la causa principale dell'effetto isola di calore urbana: a causa della elevata assorbanza solare, la temperatura di superficie aumenta di molti gradi sopra la temperatura ambiente (fino a 30 °C). L'energia assorbita viene prima immagazzinata all'interno dell'edificio e poi rilasciata nell'ambiente, trasferendo per conduttività il calore attraverso gli strati solidi e per convezione dalla superficie del materiale all'aria. Dal calore liberato deriva l'aumento delle temperature esterne ed interne. Le pavimentazioni stradali giocano un ruolo rilevante in questo bilancio energetico poiché rappresentano una porzione significativa

delle aree occupate in città, infatti la percentuale di pavimentazione risulta compresa tra il 29 e il 45% secondo un'indagine condotta in alcune città negli Stati Uniti. Strade, marciapiedi, parcheggi e zone pedonali sono generalmente realizzati in cemento e asfalto e talvolta in pietre aggregate; la riflettanza solare di questa gamma di materiali varia dal 5 al 45%, anche se i valori standard sono: 5% per il nuovo asfalto (il catrame nero copre uniformemente l'aggregato); il 15% per l'asfalto "datato" (l'aggregato emerge sulle superficie di asfalto) e il 25% per il calcestruzzo.

L'aumento della riflettanza solare dei materiali urbani è una strategia emergente che ha suscitato l'interesse degli investitori allo scopo di mitigare le temperature urbane, nonché di migliorare il rendimento energetico degli edifici. I cool material sono una particolare categoria di materiali e componenti in grado di rimanere freschi sotto la radiazione solare e sono caratterizzati da elevati valori di riflettanza solare che riducono la radiazione solare assorbita dai materiali da costruzione tradizionali e limitano l'aumento della temperatura superficiale in presenza di elevato irraggiamento. I cool material sono inoltre caratterizzati da elevati valori di emissività nell'infrarosso in grado di riemettere verso il cielo durante la notte il calore immagazzinato durante la fase diurna. Queste caratteristiche consentono al materiale di aumentare la propria temperatura superficiale solo di pochi gradi sopra la temperatura ambiente, riducendo il calore scambiato con l'aria esterna per convezione e, di conseguenza, mitigando l'effetto isola di calore urbana.

Si definisce effetto isola di calore urbana (Urban Heat Island) l'aumento della temperatura dell'aria nelle città rispetto alle aree rurali circostanti. Il fenomeno è presente a tutte le latitudini e, associato al riscaldamento globale, ha un forte impatto su ambiente, energia e salute. In questo Report è riportato il calcolo dell'intensità dell'isola di calore urbana per la città di Roma, ottenuto elaborando le acquisizioni di diversi termo-igrometri, posizionati sia in zone densamente urbanizzate che in zone di campagna limitrofe alla città. La massima intensità di isola di calore rilevata è stata 7 °C. L'aumento della riflettanza solare dei materiali urbani è una strategia volta a ridurre le temperature di superficie e dell'aria e ad attenuare l'effetto isola di calore urbana. I cool material applicati agli asfalti convenzionali sono una valida tecnologia per il raggiungimento di tale scopo. La caratterizzazione ottica è stata effettuata in laboratorio e all'aperto mostrando le proprietà e le prestazioni avanzate di diverse tinte per asfalti ad elevata riflettanza solare rispetto ai materiali tradizionali.

Sono state condotte prove spettrofotometriche anche su campioni di calcestruzzo per pavimentazione stradale, ma l'elevata dimensione dei granuli e la presenza di zone vuote, direttamente paragonabili con la dimensione del fascio generato dallo strumento, ha reso inaccurati i risultati. I dati sperimentali sono stati utilizzati come input per simulare l'ambiente esterno di un quartiere densamente popolato di Roma, consentendo di stimare l'effetto degli asfalti ad alta riflettanza sulla temperatura dell'aria.

Le simulazioni effettuate con il software ENVI-met hanno mostrato una significativa riduzione della temperatura dell'aria strettamente correlata con la riflettanza solare dei suddetti materiali. I profili di temperatura ottenuti sono stati utilizzati come input per calcolare l'impatto che le tinte per asfalti hanno a livello energetico su scala di edificio. In tal modo si sono ottenuti, tramite lo strumento di simulazione dinamica TRNSYS, i valori dei carichi energetici di raffrescamento di picco durante la stagione estiva per edifici residenziali tipici di zone densamente urbanizzate. Con i risultati ottenuti per i materiali a riflettanza solare più alta è stata calcolata una riduzione del picco di raffrescamento pari quasi al 19%.

I cool material trovano da tempo applicazione come rivestimento per i tetti (cool roof). Diversi studi condotti negli ultimi anni mostrano le potenzialità e i limiti di questa tecnologia per ridurre i fabbisogni energetici di raffrescamento e i carichi di picco attraverso prove sperimentali e analisi numeriche. I cool roof possono essere bianchi o colorati per soddisfare le esigenze di integrazione architettonica e sono caratterizzati da una riflettanza nel visibile tipica del loro colore e da una riflettenza nell'infrarosso vicino elevata, al fine di ottenere una riflettanza solare superiore anche con colori non chiari.

Mentre i cool roof sono una tecnologia consolidata con buone potenzialità di penetrazione del mercato, lo stesso non vale per i cool material per applicazioni su pavimentazione stradale. Diversi studi hanno dimostrato le potenzialità di pavimentazioni stradali e asfalti ad elevata riflettanza in termini di riduzione dei consumi di energia elettrica per il raffrescamento e miglioramento della qualità dell'aria. Al fine di evitare problemi di riverbero eccessivo dovuti all'alta riflettività della pavimentazione stradale, sono necessarie soluzioni caratterizzate da maggiore riflettanza solare e da una riflettanza luminosa moderata. Recenti sviluppi hanno dimostrato che questi materiali esistono e possono essere adeguatamente realizzati con valori di riflettanza solare di gran lunga superiori rispetto a quelli degli asfalti tradizionali.

L'effetto isola di calore urbana è un fenomeno che affligge ormai in maniera sempre più persistente i centri abitati. Questo studio ha dimostrato l'effettiva presenza del fenomeno a Roma. Infatti da un'analisi dei dati registrati durante la stagione estiva da alcune centraline meteo posizionate in diversi punti, urbani e non, della città, si è ottenuta una differenza massima di temperatura tra una zona densamente urbanizzata e una zona rurale che ha

raggiunto i 7 °C. Questa differenza massima di temperatura nell'arco del periodo in esame, ovvero l'intensità dell'isola di calore (UHII), si è verificata durante la fase notturna.

E' stato inoltre effettuato uno studio sulle potenzialità di riflessione della radiazione solare di alcuni materiali utilizzati come tinte per asfalti e come rivestimenti per pavimentazioni stradali. La caratterizzazione ottica ha evidenziato l'impatto positivo delle tinte per asfalto sull'aumento della riflettanza solare degli asfalti convenzionali. Le misurazioni spettrali hanno evidenziato anche i limiti dei prodotti testati; è dimostrato che, escluso il materiale bianco sporco, la riflettanza nell'infrarosso vicino di tutti i campioni è risultata essere sempre inferiore a 46%, valore di gran lunga inferiore rispetto a quelli dei cool material colorati per l'applicazione sul tetto degli edifici.

Migliorare la riflettanza nell'infrarosso vicino è un requisito obbligatorio per sfruttare le potenzialità del prodotto dal momento che i valori più alti di riflettanza solare possono essere raggiunti senza aumentare la riflettanza visibile, migliorando anche l'integrazione architettonica e urbana. Il monitoraggio esterno sulla temperatura superficiale ha fornito dati utili circa la capacità di queste tinte per asfalto di limitarne l'innalzamento se sottoposti alla radiazione solare. Le differenze massime di temperatura tra i campioni di colore verde, blu e grigio rispetto all'asfalto originale sono comprese tra 8 e 10 °C. I valori più bassi sono stati ottenuti con l'asfalto rosso, mentre la differenza massima, vicina a 20 °C, si è ottenuta con il campione di colore bianco sporco.

I valori medi durante il monitoraggio hanno mostrato che le temperature delle superfici trattate sono rimaste alcuni gradi inferiori rispetto agli asfalti originali, ma per rendere queste applicazioni competitive sono necessari valori di riflettanza solare e nell'infrarosso vicino ancora superiori. Il monitoraggio ha anche mostrato la differenza significativa tra il risultato ottenuto in laboratorio rispetto all'applicazione su strada per il campione di colore blu, essendo risultato il primo più assorbente rispetto al secondo. Questo aspetto, che non è rilevante per studi sperimentali, è fondamentale per l'accettazione sul mercato della tecnologia e deve essere attentamente trattato dai produttori ed installatori per avere installazioni la cui risposta cromatica sia in linea con la scelta dei clienti, che generalmente avviene attraverso la gamma dei colori campione proposta dai produttori.

L'analisi ottica allo spettrofotometro condotta sui calcestruzzi utilizzati per la pavimentazione stradale non ha prodotto risultati significativi. Infatti i prodotti non hanno capacità selettive di riflessione nella banda solare e, sebbene presentino comunque valori di trasmittanza solare superiori a quelli degli asfalti convenzionali, necessitano anch'essi di ulteriori sviluppi per incrementare la riflettanza nell'infrarosso vicino. La metodologia di misura con lo spettrofotometro commerciale ha evidenziato i suoi limiti per i test su questi materiali. L'elevata rugosità di questi ultimi, dovuta alla conformazione superficiale costituita da granuli aggregati di diverse dimensioni, non ha permesso misure accurate. La dimensione delle zone di vuoto e di pieno è risultata essere direttamente confrontabile con la dimensione del fascio incidente sul campione generato dallo strumento. Il confronto delle misure di riflettanza ottenute su diversi spot di indagine per un campione ha messo in risalto questo problema: il valore integrato della riflettanza solare ha assunto per quest'ultimo valori compresi tra 61,8 e 48% denotando come diversi punti dello stesso campione presentino poteri di riflessione diversi. Al fine di ottenere misure più accurate per materiali ad elevata rugosità e fortemente diffondenti sarà necessario l'utilizzo di strumentazioni più adeguate, equipaggiate con fasci sorgente dal diametro maggiore e grandi sfere integratrici.

Per indagare le potenzialità dell'applicazione di un asfalto ad elevate proprietà di riflessione in un tessuto urbano è stata condotta un'analisi numerica con ENVI-met, un software che utilizza un metodo di calcolo deterministico. I risultati di questo studio mettono in evidenza come queste tinte colorate, utilizzate per strade e marciapiedi, potrebbero avere un impatto sensibile, grazie alle basse temperature di superficie, sulla diminuzione della temperatura media dell'aria dell'ambiente urbano, anche a notevoli altezze dal suolo. L'entità calcolata di tale diminuzione, in una giornata estiva, raggiunge un massimo di 5,5 °C sostituendo l'asfalto convenzionale con un asfalto bianco sporco cool e questa differenza si mantiene quasi costante anche al di sopra dell'altezza media degli edifici.

Un'ulteriore analisi numerica condotta con TRNSYS ha consentito di valutare l'effetto che la diminuzione della temperatura dell'aria nelle aree urbane, derivante dall'utilizzo di cool material per asfalti, ha sui picchi del carico di raffrescamento di un edificio residenziale tipico inserito in un quartiere densamente urbanizzato di Roma. Come accennato in precedenza, sono state registrate riduzioni sensibili della domanda di raffrescamento di picco dovute all'uso di questi rivestimenti stradali: 18,9% per le configurazioni non isolate e 14,6% per l'edificio isolato.

L'utilizzo massiccio di questa tecnologia innovativa combinato con un aumento delle aree verdi porterebbe ad una sensibile riduzione dell'effetto isola di calore urbana e delle sue conseguenze con miglioramenti sui livelli di comfort e con una diminuzione degli usi energetici legati al raffrescamento negli edifici.

F. Partecipazione all'Implementing Agreement dell'IEA "Energy Conservation in Building and Community Systems"

L'obiettivo prevede il supporto ai Ministeri competenti attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali. In quest'ambito sono inserite le attività relative alla partecipazione ai gruppi di lavoro della IEA nel quadro dell'Implementing Agreement "Energy Conservation in Building and Community Systems" (ECBCS).

La partecipazione ha interessato i seguenti Annex:

- Annex 5 "Air Infiltration and Ventilation Centre" (AIVC). Lo scopo dell'Estensione dell'Annex 5, non prevista nel PAR 2008-2009, è quello di promuovere ulteriore collaborazione sul tema della ventilazione efficiente negli edifici, con una modifica di focus e di modalità operative rispetto al precedente AIVC. Per il nuovo AIVC un'area di attività sono i problemi scientifici e tecnici legati alla ventilazione efficiente in edifici very-low energy e zero-energy. Argomenti di interesse includono strumenti di valutazione, standard e regolazione, healthy buildings, la ristrutturazione di edifici esistenti e le prestazioni dei sistemi di ventilazione in condizioni reali.
- Annex 46 Low Exergy sustainable buildings: l'obiettivo dell'Annex, a cui non era prevista la partecipazione nel PAR 2008-2009, è stato quello di sviluppare una metodologia condivisa e internazionalmente valida per gli audit, applicabile in particolare agli edifici governativi e pubblici, sottolineando gli aspetti legati alla gestione del processo di audit più che i dettagli tecnici collegati agli edifici o alle attività. Il prodotto finale risulta una vera e propria guida in grado di aiutare gli utenti interessati a questo tipo di attività, tra cui i facility energy managers, le ESCo, le università e tutti coloro che sono coinvolti dalle prestazioni dell'edificio. Le problematiche relative all'audit degli edifici esistenti risultano essere di maggiore importanza nel caso di edifici pubblici ed in particolare nel caso degli edifici scolastici là dove un uso più efficace dei vettori energetici comporta sicuri vantaggi ai bilanci delle amministrazioni pubbliche. E' stata svolta un'indagine che si propone non solo di valutare le condizioni degli edifici analizzati e di delineare le strategie di riqualificazione energetica più efficaci, ma soprattutto di sperimentare una metodologia di rilievo semplificato per poterla riproporre in situazioni simili
- Annex 52 Net Zero Energy Buildings - Scopo dell'Annex è lo sviluppo di concepts per la progettazione e la realizzazione di edifici a zero emissioni. L'obiettivo generale si colloca nell'ambito dell'individuazione di metodi e sistemi per la progettazione dei sistemi edificio-impianto ed energia netta zero, anche alla luce dei più recenti indirizzi europei di politica energetica degli edifici (Position of the Council at first reading with a view to the adoption of a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (Recast) - April 7th 2010) e degli obiettivi di risparmio energetico e limitazione delle emissioni di gas serra. In questa Task è inserita l'attività del SHC Task 40
- Annex 53 Benchmark - Scopo dell'Annex è lo sviluppo di metodologie e strumenti per la misura e l'analisi dei consumi energetici degli edifi Annex 53: Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods. L'Annex 53 si propone di raggiungere una migliore comprensione dei dati di consumo energetico reale dei sistemi "edificio-impianti", per la valutazione e lo sviluppo di nuove tecnologie e misure di risparmio energetico. Rilevante diviene dunque la conoscenza dei principali fattori che influenzano il consumo totale di energia negli edifici e le loro specifiche/reciproche interazioni. Uno degli obiettivi chiave del progetto risulta dunque essere lo sviluppo di tecnologie di risparmio energetico che tengano conto del consumo energetico attribuibile sia alle prestazioni dell'edificio sia al comportamento dell'utente, al fine di prevedere entrambi gli effetti in edifici nuovi e ristrutturati, nonché il rapporto costi-benefici delle relative misure di risparmio. Obiettivo ultimo, infine, diviene la standardizzazione e il benchmarking del consumo totale di energia nell'edificio con la creazione di indici che considerino anche i fattori legati all'utente, affinché i sistemi di energy labeling siano più comprensibili per l'utente stesso, favorendone l'informazione sui comportamenti scorretti. All'Annex 53 ha partecipato il Gruppo di Ricerca Tebe del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino.
- Annex 56 Energy + GHG Optimised Building Renovation - L'obiettivo dell'annex è di promuovere un concetto di ristrutturazione degli edifici economicamente e tecnicamente ottimizzato, al fine di contribuire all'efficientamento del parco edilizio esistente e alla mitigazione dei cambiamenti climatici.
- Annex 59 High Temperature Cooling & Low temperature heating in Buildings : Obiettivo del progetto, approvato a giugno 2012 è lo studio e sviluppo di sistemi di condizionamento efficienti con particolare riferimento agli edifici del terziario. Alle attività preparatorie di questo progetto partecipa per l'Italia il Politecnico di Torino.

Sviluppo di una metodologia per l'individuazione dei requisiti di prestazione energetica ottimali in funzione dei costi. Caso studio su un contesto climatico

Lo studio ha lo scopo di sviluppare e verificare l'applicazione di una metodologia di calcolo *cost-optimal*, tramite la quale sia possibile associare un valore di fabbisogno energetico e di costo globale a varianti tecnologiche di edificio, che possa risultare utile al fine di:

- ricavare curve che evidenzino il rapporto tra consumo energetico e prestazione economica di una serie di combinazioni tecnologiche;
- sviluppare analisi di sensitività sui principali parametri di calcolo (ad esempio: tasso d'interesse, prezzi dell'energia, periodo di calcolo);
- individuare target prestazionali ottimali dal punto di vista dei costi;
- produrre statistiche sulle tecnologie edilizie che caratterizzano le combinazioni ottimali;
- confrontare i fabbisogni energetici associati all'ottimizzazione dei costi con quelli corrispondenti ai limiti forniti dalla normativa vigente e in via di definizione (con particolare riferimento all'obiettivo "a energia quasi zero");
- effettuare analisi sull'implementazione di sistemi in grado di sfruttare fonti energetiche rinnovabili in termini di convenienza economica e di valenza per il raggiungimento di edifici a energia quasi zero;
- valutare l'implementazione di politiche d'incentivo all'adozione di particolari tecnologie o al raggiungimento di obiettivi energetici limite.

L'attività [Report RdS/2012/116] è finalizzatà allo sviluppo e test di una metodologia di calcolo, applicabile nel contesto Italiano, per la caratterizzazione del "livello ottimale in funzione dei costi" ovvero il livello di prestazione energetica (fabbisogno per riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, acqua calda sanitaria e illuminazione) che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato degli edifici. Lo studio si inserisce nel quadro delineato dalle recente Direttiva Europea 2010/31/UE (altrimenti conosciuta come "EPBD Recast") che, a partire dall'analisi dell'attuale problema energetico (correlato a fattori ambientali, sociali, economici e politici), giunge all'introduzione del concetto di "Edifici ad energia quasi zero".

A partire dall'analisi critica dell'approccio di calcolo delineato dalla Commissione Europea, si è messa a punto una procedura di calcolo applicabile al contesto italiano e un esempio di applicazione della stessa per un edificio di riferimento adibito ad uffici in contesto milanese.

E' stato sviluppato uno strumento di calcolo in grado di calcolare ed associare ad un elevato numero di varianti edificio-impianto i relativi fabbisogni di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento e i relativi costi globali.

Esso è stato testato, in accoppiamento con una campagna di simulazione dinamica, per individuare e caratterizzare in prima approssimazione la regione dell'ottimo edilizio per un edificio di riferimento nel contesto di Milano. Su questa base, un lavoro di verifica del database dei costi e delle tipologie rappresentative dello stock edilizio consentirebbe di approfondire e confermare o correggere ove necessario queste prime conclusioni. In particolare, per lo specifico edificio analizzato si sono riconosciute: i) la convenienza delle tecnologie d'involucro e strategie passive analizzate (isolamento termico delle superfici opache dell'involucro edilizio, protezioni solari, ventilazione naturale notturna e soprattutto componenti finestrati ad alte prestazioni); ii) la convenienza di impianti di climatizzazione a tutt'aria, integrati a strategie di recupero del calore durante la fase di riscaldamento.

Oltre che per le analisi condotte in questo studio, la procedura di calcolo utilizzata viene proposta per sviluppare analisi di sensitività sui parametri economici di base (periodo di calcolo, tasso di interesse, tasso di inflazione, prezzi attuali e futuri dell'energia, ecc.), nonché per simulare in maniera semplificata l'effetto di politiche di incentivo economico rivolte alle tecnologie di efficienza energetica considerate

Studio di un modello di calcolo per il miglioramento del progetto estivo di pannelli radianti in edifici con elevati carichi solari"

I temi sviluppati nell'ambito di questa attività [Report RdS/2012/117] sono parte del più ampio progetto della International Energy Agency - ECBCS Annex 59 "Minimizing Temperature Difference in HVAC Systems for High Energy Efficiency in Buildings", approvato dall'Executive Committee nel mese di Ottobre 2011. Il gruppo di ricerca TEBE (Technology Energy Building Environment) del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino ha avuto un ruolo propositivo e attivo nella definizione dei contenuti del progetto, fin dalla sua fase di concezione, partecipando agli incontri preliminari tra il nucleo dei proponenti e contribuendo alla scrittura del progetto stesso.

In questa fase di start-up del progetto, l'attività dell'unità di ricerca del Politecnico di Torino ha focalizzato il proprio specifico approfondimento sui sistemi per il riscaldamento ambientale basati su impianti solari termici che

utilizzano fluidi e sistemi innovativi (con particolare riferimento a materiali a cambiamento di fase fluidizzati, "Slurry PCM"). Questa fase della ricerca è risultata essenziale per cominciare aa individuare le effettive possibilità applicative, nonché i limiti, di queste soluzioni tecnologiche integrate. Parallelamente, è stato condotto un approfondimento sulle potenzialità applicative dei pannelli radianti per la climatizzazione accoppiati a sistemi impiantistici operanti a temperatura moderata. Il tema guida della ricerca può essere sintetizzato nell'analisi delle potenzialità applicative di nuovi sistemi integrati del sistema edificio-impianto che interagiscono con la fonte energetica solare. Gli studi condotti sono propedeutici allo sviluppo di uno specifico modello di calcolo per il progetto di sistemi impiantistici per la climatizzazione, in particolare utilizzanti la tecnologia radiante, in presenza di elevati carichi solari.

Statistical Investigations And Data-Driven Prediction Methods To Assess Total Energy Use In Buildings

Lo scopo del progetto IEA-ECBCS Annex 53 è l'approfondimento dei metodi di previsione dei consumi totali e degli usi finali di energia negli edifici, 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. A questo si affianca la raccolta e l'analisi critica di esperienze significative per una migliore comprensione del comportamento energetico reale degli edifici. Inoltre, uno specifico approfondimento è dedicato allo studio del comportamento dell'utente e alla determinazione che esso ha sui consumi energetici reali degli edifici.

Rilevante diviene dunque la conoscenza dei principali fattori che influenzano il consumo totale di energia negli edifici e le loro specifiche/reciproche interazioni. Uno degli obiettivi chiave del progetto risulta dunque essere lo studio delle cause principali influenzanti il consumo energetico,tenendo conto dei fattori attribuibili sia alle prestazioni del sistema edificio-impianto sia al comportamento dell'utente, al fine di prevederne per entrambi gli effetti in edifici nuovi e ristrutturati, nonché il rapporto costi-benefici delle relative misure di risparmio.

Obiettivo ultimo, infine, diviene lo studio di tecniche per la standardizzazione e il benchmarking del consumo totale di energia negli edificio al fine di creare indici sintetici che considerino anche i fattori legati all'utente: ciò dovrebbe consentire anche una più facile comprensione dei sistemi di energy labeling da parte dell'utente stesso, favorendo l'informazione sui comportamenti scorretti.

Per raggiungere gli obiettivi sopra illustrati, l´Annex 53 si divide in 4 Subtask:

- Subtask A: Definition and Reporting
- Subtask B: Case Studies and Data Collection
- Subtask C: Statistical Analysis
- Subtask D: Energy Performance Evaluation.

L'apporto nel Subtask A ha riguardato la definizione degli indici normalizzati per la caratterizzazione delle prestazioni energetiche dell'edificio e delle caratteristiche del Database di riferimento rispetto a cui i differenti database impiegati nel progetto dovranno confrontarsi.

L'apporto nel Subtask B riguarda l'analisi di un caso studio, un edificio per uffici di piccole dimensioni nel quale è condotto un monitoraggio continuo di tipo energetico-ambientale. Gli approfondimenti sono indirizzati alla sperimentazione di tecniche monitoraggio energetico e ambientale wireless, non invasive, applicati ad un edificio storico.

L'attività nel Subtask C riguarda l´analisi d potenzialità e limiti degli strumenti statistici per una migliore descrizione degli usi finali dell´edificio e di metodi di calcolo inversi per una più robusta previsione dei consumi energetici futuri. Inoltre, cruciale diviene l´analisi dei fattori che influenzano l´uso finale di energia negli edifici, e, tra questi, il comportamento dell´utente (Task Force).

Le azioni svolte nell'ambito delle singole subtask dal gruppo di ricerca TEBE del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino sono descritte nel Report RdS/2012/118.

Comportamento dell'utente: Fattori Influenzanti Il Consumo Energetico e Modelli Descrittivi

E' stato studiata e sviluppata una proposta di un modello analitico per l' individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici degli edifici con particolare riferimento agli aspetti di apertura e chiusura delle finestre [RdS/2012/119].

Principale obiettivo della taskforce Annex 53 è la definizione di modelli stocastici del comportamento dell'utente, sviluppati sulla base dell'analisi statistica di data set ottenuti dal monitoraggio della reale interazione uomo-edificio. L'approccio pratico alla modellazione statistica si basa su quattro passaggi operazionali:

1- raccolta dati (oggettivi e soggettivi) provenienti da misurazioni in campo (monitoraggi, questionari);

2- analisi statistica dei dati raccolti e comprensione dei principali parametri influenzanti il comportamento dell'utente (coefficienti e variabili), attraverso la definizione di una curva di regressione logistica;

3- implementazione della regressione logistica in programmi di simulazione energetica dinamica;

4- considerazione di una distribuzione probabilistica degli output.

L'apertura e la chiusura delle finestre è stata considerata come input di tipo probabilistico per i programmi di simulazione energetica degli edifici. Per ognuna delle due variabili è stata costruita una funzione di regressione logistica, in seguito implementata nel programma di simulazione energetica dinamica dell'edificio IDA Ice.

Comportamento utente: modello per controllo termostato

La finalità del lavoro è stato lo studio e l'individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente, altri fattori influenzanti e consumi energetici degli edifici con particolare riferimento agli aspetti di azione sul termostato per il controllo della temperatura ambiente apertura; proposta di un modello analitico.

Al fine di valutare l'influenza del comportamento dell'occupante sui consumi energetici per il riscaldamento in edifici residenziali, le equazioni di probabilità determinate da studi precedenti per mezzo del software di analisi statistica R, sono state implementate nel programma di simulazione energetica dinamica degli edifici IDA Ice. In particolare, la regolazione del termostato viene descritta da tre differenti funzioni logaritmiche in grado di riprodurre diversi gradi d'interazione dell'utente (attivo, medio, passivo) con il sistema di controllo della temperatura interna. I consumi energetici simulati nel modello deterministico di riferimento (singoli valori di output) sono stati comparati con la distribuzione probabilistica dei risultati ottenuti dalla simulazione dei modelli probabilistici.

Design di edifici a energia netta zero alla luce della direttiva europea 2010/31/CE (EPBD recast) sulla prestazione energetica nell'edilizia

Gli obiettivi generali dell'attività [Report RdS/2012/120] si collocano nell'ambito dell'individuazione di metodi e sistemi per la progettazione dei sistemi edificio-impianto ad energia netta zero (o quasi zero), anche nell'ottica della direttiva europea sull'efficienza energetica degli edifici, degli obiettivi di risparmio energetico e limitazione delle emissioni di gas serra. I significativi consumi di energia primaria riconducibili al settore civile d'utenza in Europa necessitano di incisivi interventi di retrofit energetico per conseguire gli ambiziosi obiettivi contenuti nella strategia del 20-20-20 (Direttiva 2009/28/CE). Il concetto di Net Zero Energy Building (NZEB) sarà pertanto parte integrante della pianificazione energetica dei prossimi decenni.

L'attività di approfondimento sull'edificio oggetto di studio, la Leaf House, è stata svolta nell'ambito dei diversi filoni di ricerca quali:

1. Analisi dei dati dell'edificio esistente,
2. Redesign dell'edificio esistente,
3. Embodied energy dell'edificio esistente.
4. Partecipazione a gruppi di lavoro internazionali in seno alla task 40 dell'IEA.

Gli indicatori sviluppati nel corso dei lavori della Task 40 sono stati applicati al caso studio Leaf House, dimostrandone l'efficacia nell'identificare e descrivere il problema del mismatch.
L'approfondimento nell'ambito del redesign dell'edificio ha permesso di stimare dei consistenti risparmi di energia elettrica qualora le soluzioni impiantistiche e tecnologiche venissero implementate. L'analisi LCA ha consentito di stimare l'embodied Energy del sistema edificio-impianto.

Nel rapporto sono stati illustrati i risultati dei differenti filoni di ricerca afferenti all'attività. Gli indicatori sviluppati nel corso dei lavori della Task 40 sono stati applicati al caso studio Leaf House, dimostrandone l'efficacia nell'identificare e descrivere il problema del mismatch. Si è altresì dimostrato come la minimizzazione dei fenomeni di mismatch può essere perseguita nell'ambito dell'ottimizzazione di sistemi di accumulo progettati ad hoc.

L'approfondimento nell'ambito del redesign dell'edificio ha permesso di stimare dei consistenti risparmi di energia elettrica qualora le soluzioni impiantistiche e tecnologiche venissero implementate.

L'analisi LCA ha consentito di stimare l'embodied Energy del sistema edificio-impianto. Sarebbe altresì utile effettuare uno studio LCA anche sulle soluzioni di redesign proposte per verificarne la sostenibilità energetica e ambientale.

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Politecnica delle Marche Dipartimento di Energetica

Questa attività svolta dall'Università Politecnica delle Marche era finalizzata alla creazione dell'anno caratteristico per le province italiane e l'aggiornamento dei dati climatici della UNI 10349. Sono pertanto disponibili sia dati climatici medi mensili, da utilizzarsi per valutazioni energetiche degli edifici con codici di calcolo in regime semistazionario (UNI/TS 11300), che dati orari per codici di calcolo in regime dinamico.
La revisione della norma UNI 10349 risulta essere un riferimento importante per l'applicazione delle procedure per i calcoli dei fabbisogni energetici degli edifici e per le valutazioni energetiche da effettuare per l'utilizzo delle fonti rinnovabili (solare termico e solare fotovoltaico). *(rif. Obiettivo A)*

Politecnico di Milano, Dipartimento di Energetica

Il contributo del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano ha riguardato sia l'analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor che lo sviluppo di una metodologia per l'individuazione dei requisiti di prestazione energetica ottimali in funzione dei costi. E' stato, in merito, condotto un caso studio su un contesto climatico.

Politecnico di Milano, Dipartimento BEST

Le attività prevedevano l'analisi, tramite simulazioni dinamiche, di un caso-studio relativo ad un edificio-tipo del terziario soggetto a riqualificazione, involucro e impianti, per raggiungere il target Nearly Zero Energy Building (NZEB), con riferimento alle attività 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.

Finalizzato agli scopi allargati dell'obiettivo B, 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).

Università di Pisa, Dipartimento Energetica

Le attività sviluppate dall'Università di Pisa sono state finalizzate a sviluppare un software per l'audit energetico negli edifici del civile, residenziale e non residenziale. Il software ha tenuto conto della metodologia sviluppata nella precedente annualità, degli ultimi decreti normativi varati e delle norme tecniche relative (UNITS 11300 parte 1,2 e 3). La messa a punto di questo strumento ha richiesto un approfondito lavoro di studio e ricerca per cercare di mettere a punto uno strumento "semplice" da utilizzare pur nella complessità per gli aspetti che investono le raccomandazioni della certificazione energetica degli edifici e per quanto viene richiesto dal DLgs 115/09. Questo strumento potrà essere utilizzato, per la definizione dei contratti di servizio energia e per quelle PA che dovranno promuovere interventi di audit energetico per la riqualificazione de patrimonio edilizio pubblico.

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento dell'Energia

Il Dipartimento dell'Energia (già DREAM - Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali) dell'Università degli Studi di Palermo ha fornito il proprio contributo alle attività sul design di edifici a energia netta zero alla luce della direttiva europea 2010/31/ce (epbd recast) sulla prestazione energetica nell'edilizia.

Università degli Studi di Roma "Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Le attività hanno riguardato l'acquisizione dei dati di consumo, una campagna di rilevazioni dei consumi energetici, la valutazione dei dati e proposte per l'applicazione di sistemi tecnologici BEMS per la riduzione dei consumi in un grande centro polisportivo pubblico, per l'ottimizzazione energetica del sistema edificio impianto, anche nell'ottica della nuova direttiva europea sull'efficienza energetica degli edifici e degli obiettivi di risparmio energetico e limitazione delle emissioni di gas serra.

In particolare i temi sviluppati dall'Università di R ma hanno riguardato lo studio, acquisizione dei dati di consumo, elaborazione e valutazione dei dati per la definizione dei consumi energetici in un grande centro sportivo, il complesso Giulio Onesti dell'Acqua Acetosa a Roma e le potenzialità di adozione di un sistema di Building Energy Management System per l'efficienza energetica.

Politecnico di Milano, Dipartimento BEST

Le attività sviluppate dal Politecnico di Milano, sono relative allo studio delle prestazioni di materiali/prodotti di finitura per l'involucro edilizio, in particolare la variazione delle proprietà ottico-radiative delle superfici edilizie nel tempo. Il programma ha sviluppato una procedura combinata per lo sporcamento e l'invecchiamento accelerati (in laboratorio), messa a punto grazie ai risultati ottenuti con l'esposizione di campioni in esterno. Un protocollo di valutazione dello sporcamento e invecchiamento accelerato consentirebbe di accorciare i tempi dello sviluppo di prodotto di materiali ad alta riflettanza, e di trattamenti superficiali che consentano di mantenere nel tempo le prestazioni, riducendo quindi i costi energetici e di manutenzione di un edificio

Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica

L'attività del Politecnico di Torino ha riguardato la definizione dei parametri energetici da utilizzare per la metodologia comparativa, prevista dalla Direttiva 32720107CE, per la valutazione degli standard nazionali per la certificazione energetica degli edifici previsti dal quadro normativo vigente.

Le attività si articolano in due fondamentali tematiche per una migliore comprensione degli usi energetici finali negli edifici: le potenzialità di impiego dei modelli inversi per lo studio dei consumi energetici e l'influenza del comportamento degli occupanti sui consumi stessi, con modelli predittivi diretti che indiretti (*data-driven*), al fine di identificare e valutare l'efficacia di misure, tecniche e politiche di risparmio energetico applicate alla scala sia di singolo edificio che di grande patrimonio edilizio.

Come previsto dal Piano Annuale di Realizzazione, sono stati avviati dei contratti di ricerca con alcuni operatori per la compiuta esecuzione delle attività, in particolare il **Centro Ricerche CRESME** ha continuato l'attività di ricerca ed indagine per la definizione del parco immobiliare del settore del residenziale. Il rapporto ha definito la consistenza degli edifici di questa destinazioni d'uso e ne ha caratterizzato la distribuzione sul territorio e le caratteristiche tipologiche costruttive ed impiantistiche, i consumi e le potenzialità di interventi finalizzati alla efficienza energetica. 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.

Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

La domanda di energia per il condizionamento estivo degli ambienti è aumentata considerevolmente negli ultimi anni ed il trend è ancora fortemente in crescita. I picchi di domanda di energia elettrica si verificano nei periodi estivi, in concomitanza con le necessità di condizionamento degli ambienti e, più in generale, di alimentazione della catena del freddo.

Il crescente aumento dei prezzi dell'energia da un lato, l'inquinamento e i cambiamenti climatici in atto sul fronte ambientale, avranno sempre più un forte impatto sull'ecosistema a livello mondiale. Il consumo di fonti primarie, quali i combustibili fossili, gasolio e gas, per il riscaldamento e la climatizzazione, impongono una riflessione per la tutela e la preservazione dell'ambiente per le generazioni future, oltre che per i rilevanti costi connessi.

Senza rinunciare al comfort ed utilizzando in modo appropriato le fonti di energia rinnovabile disponibili, si ottengono quindi i risultati desiderati di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale.

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 in quanto garantiscono valori di COP (*Coefficient Of Performance*) ed EER (*Energy Efficiency Ratio*) molto limitati.

Negli ultimi anni diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico si sono 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. 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 con la disponibilità di energia solare.

Il SET Plan europeo individua tra i settori strategicamente più interessanti per il raggiungimento degli obiettivi di contenimento della spesa energetica da fonti fossili, quello relativo allo sviluppo delle tecnologie di *solar heating & cooling* soprattutto nei settori civile (caratterizzato da una sempre maggiore richiesta di energia per il condizionamento degli ambienti ad uso residenziale e terziario) ed industriale per la 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 impiagate 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 e accumulata nell'aria, nell'acqua e nel suolo, senza nessuna emissione diretta in atmosfera e nessun utilizzo di combustibile fossile. Il calore fornito dal sole è infatti una fonte pulita ed inesauribile, rendendo la pompa di calore una fonte rinnovabile, riconosciuta come tale dalla Direttiva europea RES "Renewable Energy Source".

Contestualmente alla climatizzazione elio-assistita, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura rappresentano un settore che può contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (*CHP - Combined Heat Power*) che consentirebbero quindi un uso più efficiente dell'energia. In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata dai sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili ed in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare a micro-impianti a fluido organico (ORC) per la produzione congiunta di calore/freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione, si baserà sul livello di temperatura di progetto dell'impianto per cui potranno essere presi in considerazione sia concentratori basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC o su concentratori parabolici lineari o a lenti di Fresnel.

Il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, attuazione della direttiva europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, impone che nel caso di *edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti*, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- il 20% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- il 35% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- il 50% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Gli unici generatori in grado di rispettare i dettami del DLgs sono le pompe di calore elettriche a compressione, le pompe di calore alimentate a gas (sia a compressione che ad assorbimento), le caldaie a biomassa e gli impianti di solar heating and cooling.

Non esiste una sola tecnologia che sia sempre la migliore in qualsiasi situazione: la località di installazione, la destinazione d'uso, il tipo di edificio, la superficie da servire ed il numero di ora 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

Lo scopo 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:

a. componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
b. 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 in edifici "dimostratori" consentirà, validando i modelli di ottimizzazione multiparametrica appositamente sviluppati, di poter realmente 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. In questo contesto si sviluppano: sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi

L'attività si poneva l'obiettivo di sviluppare 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 Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione dell'innovativo impianto di solar cooling realizzato a servizio dell'edificio F92

L'impianto di solar heating and cooling presente all'interno del Centro Ricerche ENEA di Casaccia è stato realizzato allo scopo di riscaldare durante il periodo invernale e di climatizzare durante il periodo estivo l'Edificio F-92 [Report RdS/2012/122]. L'edificio si sviluppa su tre livelli (superficie totale pari a circa 230 m^2) di cui ognuno servito da un circuito idraulico indipendente in modo tale da realizzarne l'esclusione, attraverso l'impianto di regolazione, quando le condizioni termo igrometriche dello stesso sono soddisfatte. L'impianto può essere suddiviso in centrale di produzione, campo solare, termodotto di collegamento tra la centrale di produzione ed edificio, sottocentrale di edificio che smista ai vari circuiti il fluido termovettore, terminali d'impianto, rappresentati da pannelli radianti a pavimento e da fan coil a cassetta installati a soffitto. Si riepilogano nei paragrafi successivi i principali risultati ottenuti durante il monitoraggio invernale ed estivo dell'impianto.

Monitoraggio invernale

I dati sperimentali relativi al monitoraggio invernale dell'impianto sono stati acquisiti durante il periodo 09 febbraio-15 aprile 2012. Si è deciso di far funzionare l'impianto in modo continuo (24 ore) dal 09 febbraio al 17 febbraio 2012 e di impostare un funzionamento di tipo intermittente dal 19 febbraio al 15 aprile 2012 (funzionamento intermittente: ore 7.00-17.00). Nei giorni 10 e 11 febbraio 2012 si sono verificate copiose precipitazioni nevose che hanno compromesso il funzionamento dei collettori solari poiché ricoperti totalmente da una spessa coltre di neve. L'analisi dei dati sperimentali permette di valutare le prestazioni dell'impianto in modalità heating determinando in che percentuale la produzione di energia realizzata dal campo solare soddisfi il fabbisogno energetico dell'intero edificio. Le grandezze indagate riguardano la produzione di acqua calda utilizzata per il riscaldamento invernale degli ambienti, e quindi la parte d'impianto costituita dall'accumulo caldo, dal campo solare, dalla caldaia integrativa e dai rispettivi scambiatori di calore. Il flusso energetico destinato all'edificio segue un diverso iter, indagabile attraverso i contatermie installati (Tabella 66), a seconda se interviene la caldaia integrativa o il campo solare. In questo ultimo caso, l'energia prodotta dal campo solare dipende ovviamente dall'irradianza solare incidente sui pannelli mentre quella effettivamente utilizzata per caricare l'accumulo dipende dall'attivazione del dry cooler e dallo scambio termico che avviene attraverso lo scambiatore a piastre interposto tra il circuito solare ed il puffe (Figura 322). I dati energetici misurati attraverso i contatermie, vengono forniti dal BMS con cadenza oraria, giornaliera e mensile.

Tabella 66. Codici identificativi contatermie installati

Legenda	
Month/Day	Istante di acquisizione
FE01	Energia prodotta dal campo solare [kWh]
FE02	Energia scambiata dal campo solare con l'accumulo [kWh]
FE03	Energia prodotta dalla caldaia integrativa [kWh]
FE07	Energia inviata all'edificio attraverso il termodotto [kWh]

Figura 322. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari (inverno)

L'energia prodotta dal campo solare è conseguenza diretta delle condizioni metereologiche, dei dati climatici, del periodo dell'anno e dei dati geografici della località in cui l'impianto è ubicato (Tabella 67).

Tabella 67. Dati climatici e geografici della località di Casaccia

Latitudine	42°03' N
Longitudine	12°18' Est
Zona Climatica	D
Accensione Impianti Termici	12 ore giornaliere dal 1 novembre al 15 aprile

La radiazione solare incidente sul piano dei collettori, inclinati di 38° rispetto al piano orizzontale, è stata calcolata a partire dai dati sperimentali di irradianza solare globale orizzontale e diffusa orizzontale (W/m^2) rilevati da una stazione meteo (Figura 323) installata sulla copertura dell'edificio F-92.

Figura 323. Stazione di acquisizione dati solari e stazione meteo (Urtin-Pci)

I valori della temperatura dell'aria esterna (Figura 324) vengono acquisiti dal sistema BMS ogni dieci minuti a partire dai rilevamenti effettuati da una sonda di temperatura da esterno installata in campo.

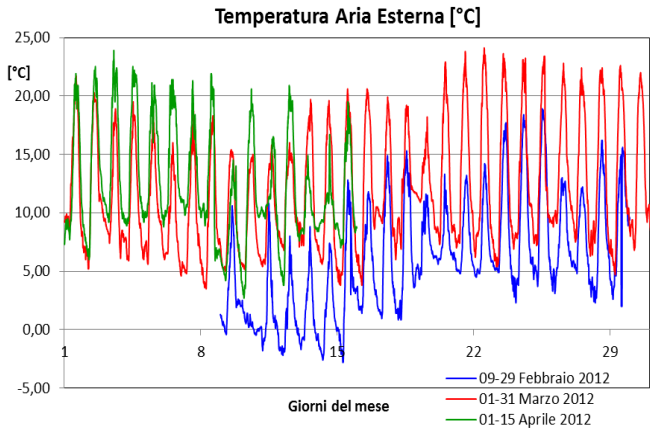


Figura 324. Temperatura giornaliera aria esterna durante l'intero periodo di monitoraggio

Nei mesi monitorati, le condizioni meteo e termo igrometriche esterne variano all'interno del periodo di monitoraggio, determinando una diversa radiazione solare incidente sui collettori. A marzo la radiazione solare incidente sui collettori totalizzata è stata maggiore rispetto agli altri mesi (10.917 kWh) a causa sia di un numero maggiore di giorni di monitoraggio (31 giorni contro i 21 giorni di febbraio ed i 15 giorni di aprile) e sia della maggiore temperatura media mensile dell'aria esterna (circa 12 °C), maggiore di quella del mese di febbraio (6 °C) e molto vicina a quella di aprile. Inoltre, per l'80% circa della sua durata, il mese di marzo è stato interessato dalla presenza di cielo sereno, mentre a febbraio (Radiazione solare incidente sui collettori pari a 5703 kWh) tale percentuale diminuisce (67% circa) a causa della presenza di precipitazioni nevose (10 e 11 febbraio 2012) e piovose accompagnate da una nuvolosità sparsa alternata a schiarite. Per tenere conto dell'effetto della neve circostante ai pannelli solari, nel calcolo della radiazione solare incidente su di essi è stato necessario utilizzare il coefficiente di riflessine specifico per la neve nei giorni compresi tra il 13 febbraio e il 16 febbraio 2012 (ρ=0,75 contro ρ=0,22 utilizzato nel resto del periodo di monitoraggio). La radiazione solare incidente sui collettori totalizzata nel mese di aprile (3.825 kWh) è riferita ai soli primi quindici giorni del mese (Figura 325).

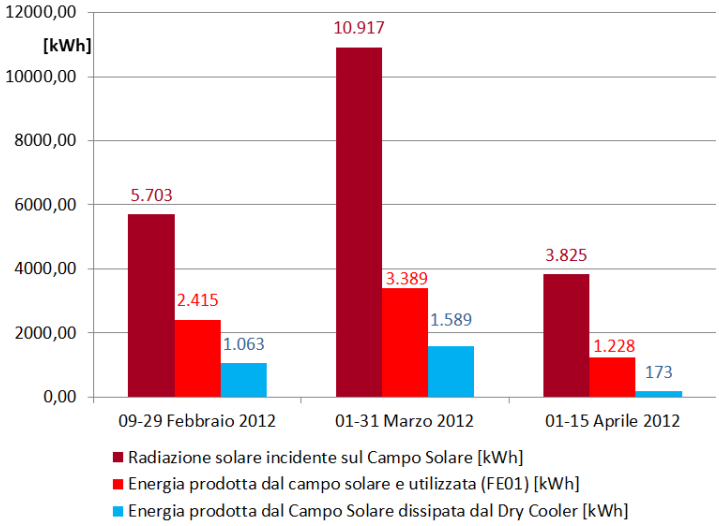


Figura 325. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio invernale

Il serbatoio d'accumulo riceverà sempre un'energia minore di quella incidente sui collettori solari a causa delle perdite ottiche e termiche sui pannelli, dell'andamento della irradianza solare (A), della dissipazione energetica realizzata dal dry cooler (B), della temperatura in uscita campo solare inferiore a quella dell'acqua all'interno dell'accumulo ($D2_a$), dell'efficienza di scambio termico dello scambiatore a piastre SC01 ($D2_b$). L'irradianza solare (W/m^2) incidente sui collettori è rappresentata da una curva sinusoidale quando si riferisce a condizioni di cielo sereno mentre ha un andamento irregolare nel caso di alternanza di nubi. Tale andamento si ripercuote sulla produzione di energia realizzata dal campo solare influenzando negativamente sull'efficienza dei collettori. Nel mese di febbraio (9-29) l'irradianza solare globale orizzontale ha avuto un andamento sinusoidale per la maggior parte del tempo per poi peggiorare decisamente in quasi tutti i giorni del mese di aprile (1-15) in cui presenta infatti un andamento decisamente irregolare. Il mese di marzo rappresenta un caso intermedio tra quello di febbraio e di aprile. Di conseguenza l'efficienza dei collettori solari è maggiore a febbraio per poi diminuire a marzo ed ulteriormente ad aprile. Nella Figura 326 si riporta l'energia effettivamente fornita dal campo solare per il riscaldamento dell'edificio, depurata dalle perdite sopra descritte (A+B=D1 e $D2_a$+$D2_b$=D2) e considerando che l'energia termica scambiata tra il circuito primario solare e l'accumulo differisce da quella effettivamente utilizzata

(kWh utili solari) per il parziale soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio (Calore accumulato ma non utilizzato: D3).

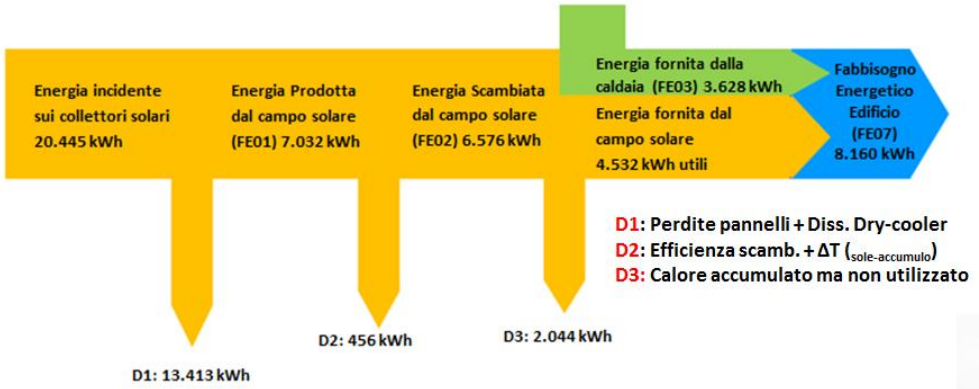


Figura 326 . Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio invernale

La restante aliquota del fabbisogno energetico dell'edificio è soddisfatta ovviamente dalla caldaia integrativa che viene caratterizzata dalla misurazione della temperatura dell'acqua in ingresso ed in uscita dalla stessa e attraverso il contatermie FE03. Il fabbisogno energetico dell'edificio viene monitorato attraverso il contatermie FE07 posto sulla mandata del termodotto. I dati acquisiti dal BMS vengono rielaborati in grafici e tabelle (Figura 327) al fine di mostrare i diversi contributi energetici del campo solare (kWh utili) e della caldaia integrativa (FE03) per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio (FE07).

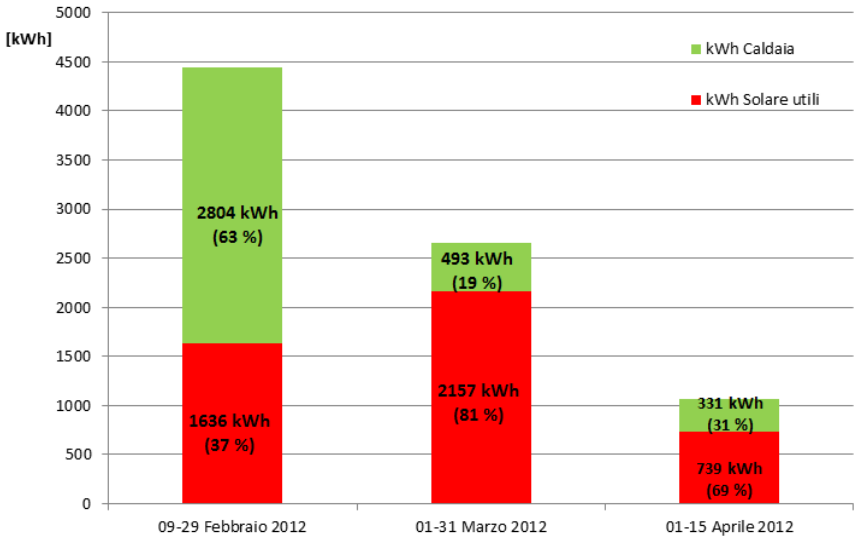


Figura 327. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare al fabbisogno energetico dell'edificio periodo invernale di monitoraggio

Il fabbisogno energetico dell'edificio nel mese di febbraio è maggiore rispetto agli altri mesi in quanto esso è stato caratterizzato da condizioni metereologiche più severe, tali da determinare una temperatura dell'aria esterna media mensile di circa 6 °C, con temperature sempre inferiori a 20°C durante tutto l'arco della giornata. I risultati ottenuti per il mese di febbraio mostrano come il funzionamento della caldaia ha contribuito con una maggiore percentuale (63%) al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edifico, rispetto a quanto fornito dal campo solare (37%), sia per le avverse condizioni meteo riscontrate e sia per alcune inefficienze legate al sistema di regolazione, essendo ancora vigente una logica di regolazione antecedente a quella attualmente impostata, quest'ultima più raffinata ed efficiente. Nel mese di marzo, in seguito ad una maggior presenza di sole, all'aumento della temperatura dell'aria esterna e all'implementazione della nuova logica di regolazione (22 marzo 2012), si è verificata una minor richiesta di energia da parte dell'edificio rispetto al mese precedente, per il raggiungimento dei setpoint ambiente; l'energia è stata fornita all'edificio per l'81% dal campo solare.

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar heating durante l'intero periodo di monitoraggio, si può calcolare la frazione solare dell'energia termica necessaria per il riscaldamento dell'edificio (Figura 328).

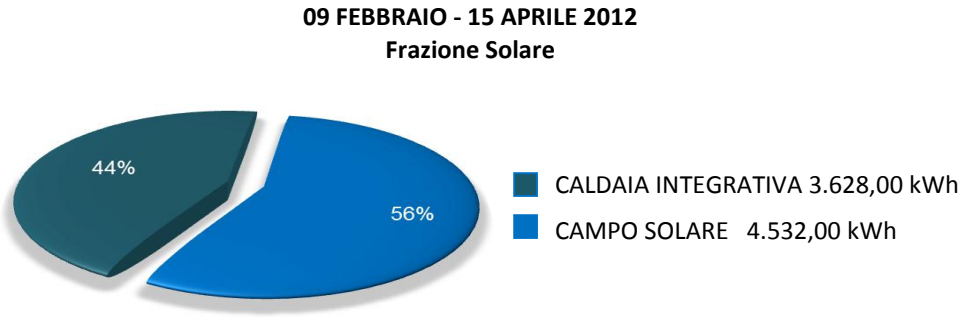


Figura 328. Frazione solare impianto di solar heating C.R. ENEA di Casaccia

L'obiettivo finale del funzionamento dell'impianto di solar heating è il raggiungimento dei valori di setpoint di temperatura da parte di ciascun ambiente dell'edificio ed il mantenimento della stessa all'interno di un range prefissato. Tali temperature vengono acquisite ogni dieci minuti dal BMS ma, a causa della grande mole di dati, vengono di seguito riportate le sole medie giornaliere (Figura 329). Dal grafico si nota la presenza di un minimo in corrispondenza del 21 febbraio 2012 (52° giorno monitorato) causato da un fermo impianto, necessario per un intervento di manutenzione.

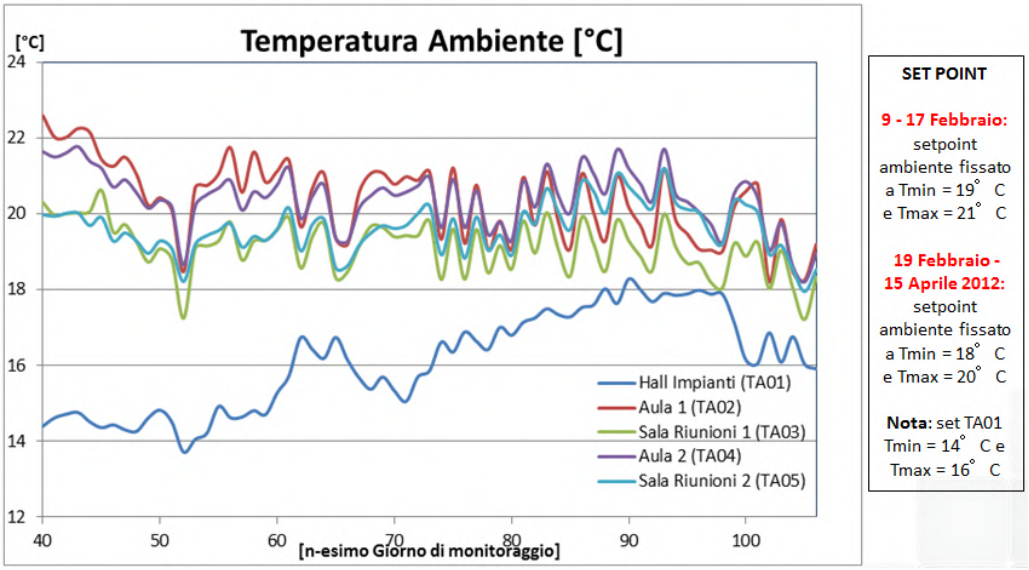


Figura 329. Temperature di ciascun ambiente costituente l'edificio (ore 6:00- ore 18:00)

E' inoltre evidente che l'andamento delle temperature ambiente dipende dai setpoint fissati lungo tutto il periodo di monitorato: durante il funzionamento di tipo continuo (24 ore, 9 febbraio-17 febbraio 2012) il setpoint ambiente era fissato a T_{min} = 19 °C e T_{max} = 21 °C mentre in funzionamento intermittente (ore 7:00-17:00, 19 febbraio-15 aprile 2012) è stato impostato T_{min} = 18 °C e T_{max} = 20 °C.

Monitoraggio estivo

I dati sperimentali relativi al monitoraggio estivo dell'impianto sono stati acquisiti durante il periodo 01 giugno-15 settembre 2012, per il quale si è deciso di far funzionare l'impianto in modo intermittente (funzionamento intermittente: ore 9:00-19:00). Le grandezze indagate riguardano la produzione di acqua calda utilizzata per alimentare termicamente il gruppo frigo ad assorbimento, e quindi la parte d'impianto costituita dall'accumulo caldo, dal campo solare, dalla caldaia integrativa e dai rispettivi scambiatori di calore.

Figura 330. Schema produzione e fornitura energia a partire dai collettori solari (estate)

L'energia termica in ingresso all'assorbitore è prodotta, a seconda dell'irradianza solare incidente sui pannelli, dal campo solare oppure dalla caldaia integrativa: i contatermie utilizzati per il monitoraggio dell'impianto ci consentono di valutare l'energia fornita dal campo solare e la restante parte fornita dalla caldaia integrativa (Figura 330).

Durante il monitoraggio estivo, oltre a quanto riportato in Tabella 66 per il periodo invernale, è stato necessario anche monitorare i contatermie a servizio del gruppo frigo ad assorbimento (Tabella 68):

Tabella 68. Codici identificativi contatermie installati per monitoraggio estivo

Legenda	
Month/Day	Istante di acquisizione
FE04	Energia termica smaltita da torre evaporativa [kWh]
FE05	Energia termica in ingresso al gruppo frigo [kWh]
FE06	Energia frigorifera prodotta [kWh]

In Figura 332 si riportano i flussi energetici necessari alla valutazione del COP (Coefficient of performance), nelle reali condizioni di funzionamento, del gruppo frigo ad assorbimento.

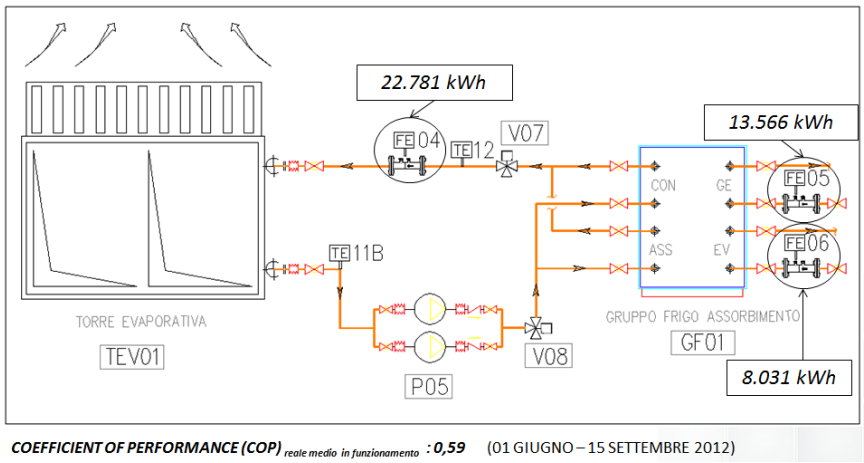


Figura 331. Valutazione prestazioni reali gruppo frigo ad assorbimento

Rispetto al valore di targa (COP=0,7), si è constatato un rendimento inferiore (COP_{medio}=0,59) rispetto al valore atteso poiché non sempre il gruppo frigo ha lavorato in condizioni nominali di funzionamento ($T_{acqua\ calda\ in}$=88 °C). Lavorando con temperatura dell'acqua inferiori, il gruppo riduce di molto il COP (Figura 332).

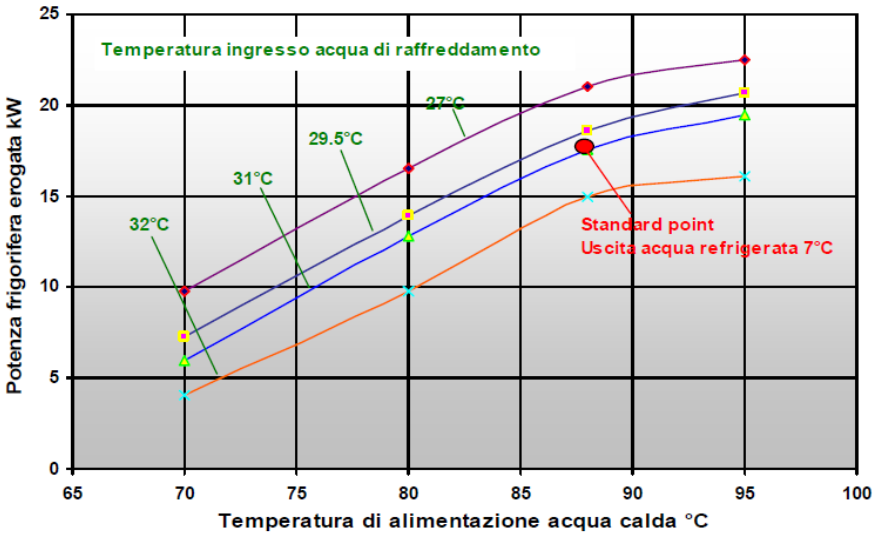
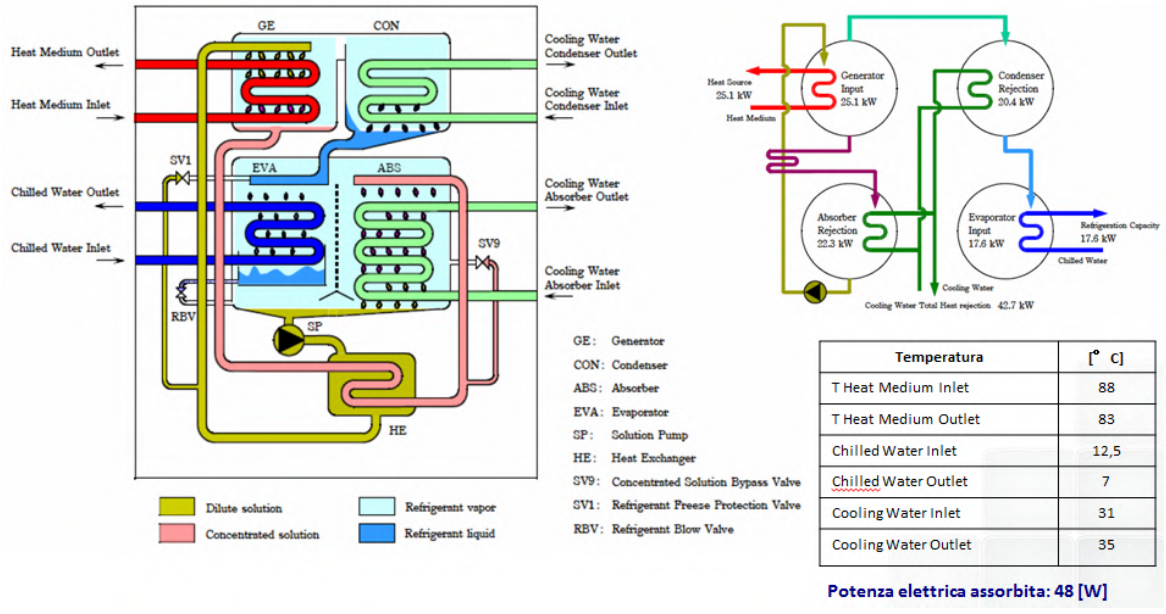


Figura 332. Curve caratteristiche di prestazione gruppo frigo YAZAKI mod. WFC-SC5

Ipotizzando una temperatura media di alimentazione acqua calda pari a $T_{acqua\ calda\ in}$ = 80 °C ed ipotizzando una temperatura in ingresso acqua di raffreddamento pari a $T_{acqua\ raffr\ in}$ = 32 °C si ha una potenza frigorifera erogata dal gruppo pari a P_f = 10 kW, contro i 17,6 kW che si hanno in funzionamento nominale della macchina. Questo esempio serve solo per evidenziare quanto decadano le prestazioni del gruppo frigo se in funzionamento reale ci si discosta dai valori di targa di funzionamento della macchina. Una riduzione del COP è anche legata al funzionamento non a regime della macchina: nei primi quindici giorni di giugno, così come in buona parte del mese di settembre, la macchina era soggetta a ripetuti on/off in quanto il carico frigorifero richiesto dall'utenza era inferiore rispetto a quanto prodotto dalla macchina.

In Figura 333 si riepiloga la modalità di funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento ed i dati di targa dello stesso.



Temperatura	[° C]
T Heat Medium Inlet	88
T Heat Medium Outlet	83
Chilled Water Inlet	12,5
Chilled Water Outlet	7
Cooling Water Inlet	31
Cooling Water Outlet	35

Figura 333. Modalità di funzionamento gruppo frigo YAZAKI mod. WFC-SC5

Nei mesi monitorati, le condizioni meteo e termo igrometriche esterne variano, determinando una diversa radiazione solare incidente sui collettori. E' da notare come, a differenza del periodo invernale durante il quale la

quota di energia dissipata con il dry-cooler era significativa, durante il periodo estivo l'energia termica dissipata è praticamente trascurabile. Questo aspetto è legato al dimensionamento del campo solare, effettuato per garantire durante il periodo estivo l'energia termica necessaria per il funzionamento del gruppo frigo ad assorbimento. L'energia termica prodotta dal campo solare risulta invece essere esuberante per effettuare il riscaldamento dell'edificio (Figura 334).

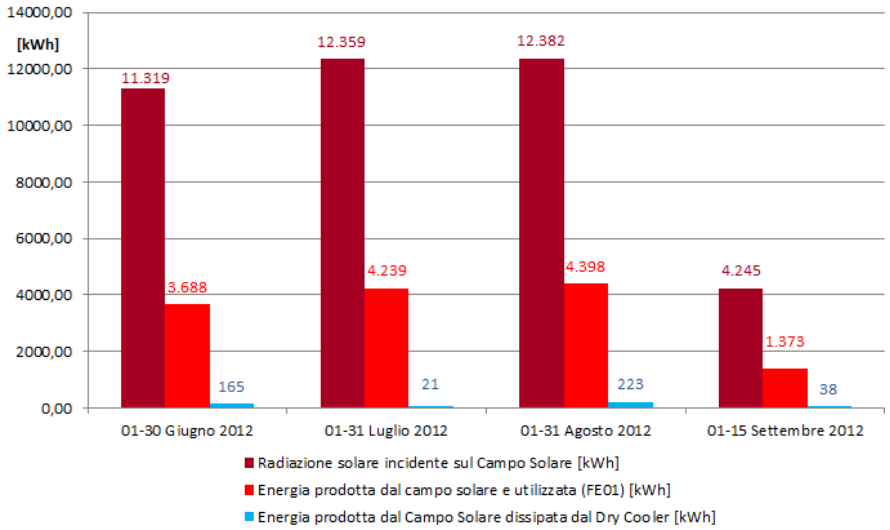


Figura 334. Radiazione solare incidente sul piano dei collettori solari termici durante il periodo di monitoraggio estivo

Nella Figura 335 si riporta l'energia effettivamente fornita dal campo solare per alimentare il gruppo frigo, depurata dalle perdite precedentemente descritte (A+B=D1 e $D2_a$+$D2_b$=D2) e considerando che l'energia termica scambiata tra il circuito primario solare e l'accumulo differisce da quella effettivamente utilizzata (kWh utili solari) a causa della temperatura dell'acqua accumulata, insufficiente ad alimentare il gruppo frigo (T_{min}=80 °C) (Calore accumulato ma non utilizzato: D3).

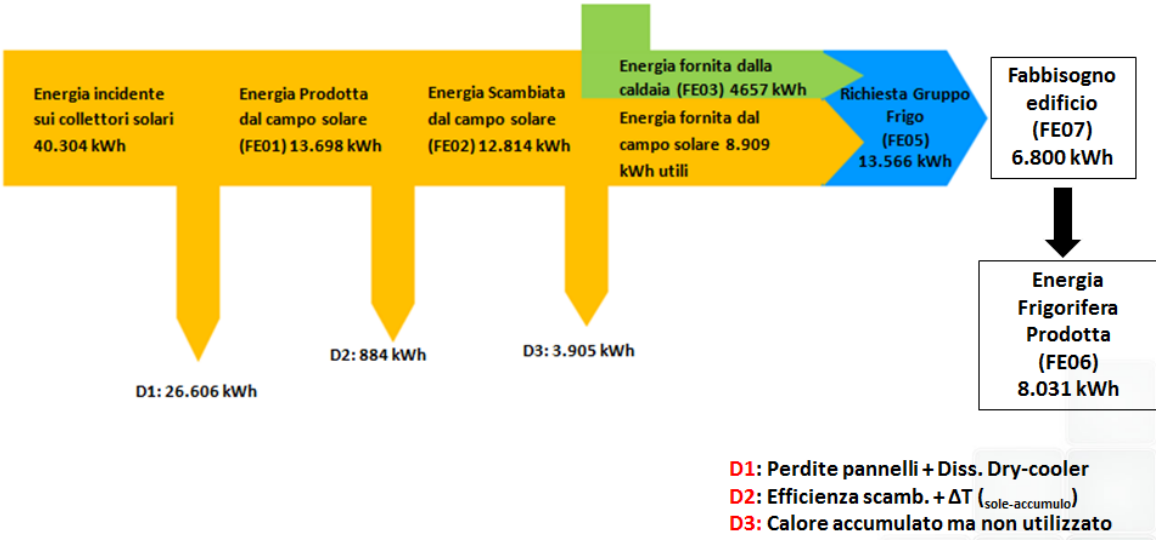


Figura 335. Diagramma del Flusso energetico di tutto il periodo di monitoraggio estivo

In Figura 336 si riporta, per i vari mesi monitorati, il contributo termico al gruppo frigo ad assorbimento fornito dal campo solare e dalla caldaia integrativa.

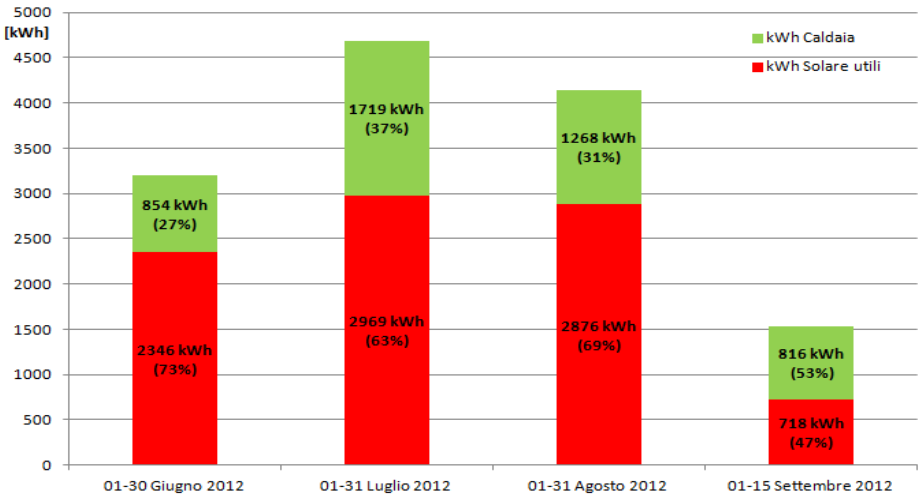


Figura 336. Contributi energetici della caldaia integrativa e del campo solare in ingresso al gruppo frigo ad assorbimento

Riepilogando il comportamento dell'impianto di solar cooling durante l'intero periodo di monitoraggio, si può calcolare la frazione solare dell'energia in ingresso al gruppo frigo (Figura 337):

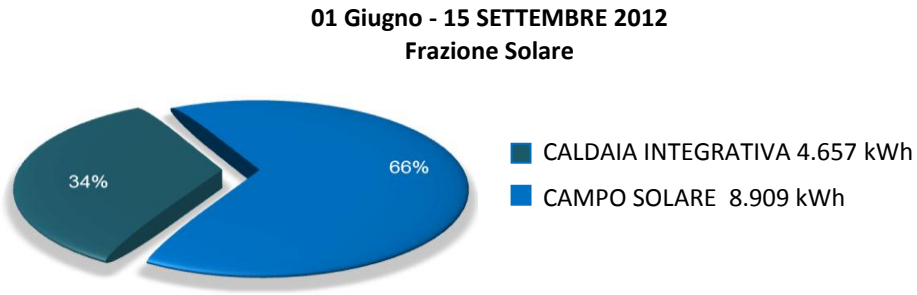


Figura 337. Frazione solare impianto di solar cooling C.R. ENEA di Casaccia

La frazione solare sopra riportata è stata ottenuta sempre garantendo le condizioni di comfort termoigrometrico all'interno degli ambienti serviti dall'impianto di solar cooling (Figura 338).

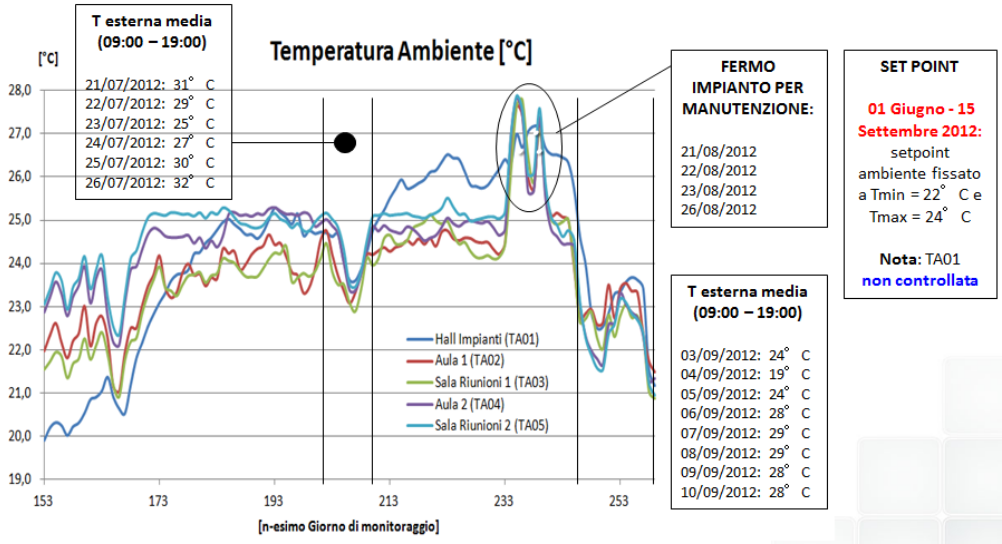


Figura 338. Frazione solare impianto di solar cooling C.R. ENEA di Casaccia

La logica di regolazione gestisce il mantenimento della temperatura di set point ambiente mediante l'impianto a pannelli radianti a pavimento (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in\ pannelli}$ =14°C) ed effettua il raggiungimento del set point con l'impianto a ventilconvettori (alimentato con acqua in ingresso a $T_{in\ fancoil}$ =7°C): questa soluzione ha consentito di ottimizzare la produzione di acqua refrigerata necessitando di acqua molto fredda solo nelle ore più calde della giornata, quando il contributo dell'energia termica, in ingresso al gruppo frigo, è prodotta quasi interamente dal campo solare. La caldaia entrerà in funzione solo quando le temperature nei vari ambienti non sono soddisfatte e l'accumulo freddo è stato quasi del tutto utilizzato.

Conclusioni

L'impianto di solar heating e cooling qui descritto ha sempre permesso durante il periodo di monitoraggio, sia invernale che estivo, il mantenimento delle condizioni di comfort termoigrometrico all'interno degli ambienti dell'edificio servito, dove le temperature interne sono state mantenute all'interno dei range stabiliti grazie alla logica di regolazione. È stato riscontrato un risparmio in termini di consumi di energia primaria di natura fossile grazie allo sfruttamento della radiazione solare: durante il funzionamento invernale il sole ha coperto il 56% dei consumi per il riscaldamento degli ambienti; nel funzionamento estivo c'è stata una copertura da fonte solare del 66% dell'energia termica richiesta dal gruppo frigo ad assorbimento.

Questi risparmi energetici si traducono di conseguenza in risparmi economici che purtroppo non sono sufficienti a rendere competitivi questa tipologia di impianti, a causa del loro elevato costo ed in particolare del gruppo frigo ad assorbimento; questo rende i tempi di rientro dell'investimento ancora inaccettabili.

Ci sono però delle prospettive incoraggianti in questo senso, dovute alla continua evoluzione di questa tecnologia: infatti una miglioria prevista consiste nell'installazione di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase che consenta a parità di temperatura una maggiore aliquota di energia termica accumulata, cosa che permetterebbe un maggiore sfruttamento della fonte rinnovabile anche qualora questa risultasse insufficiente.

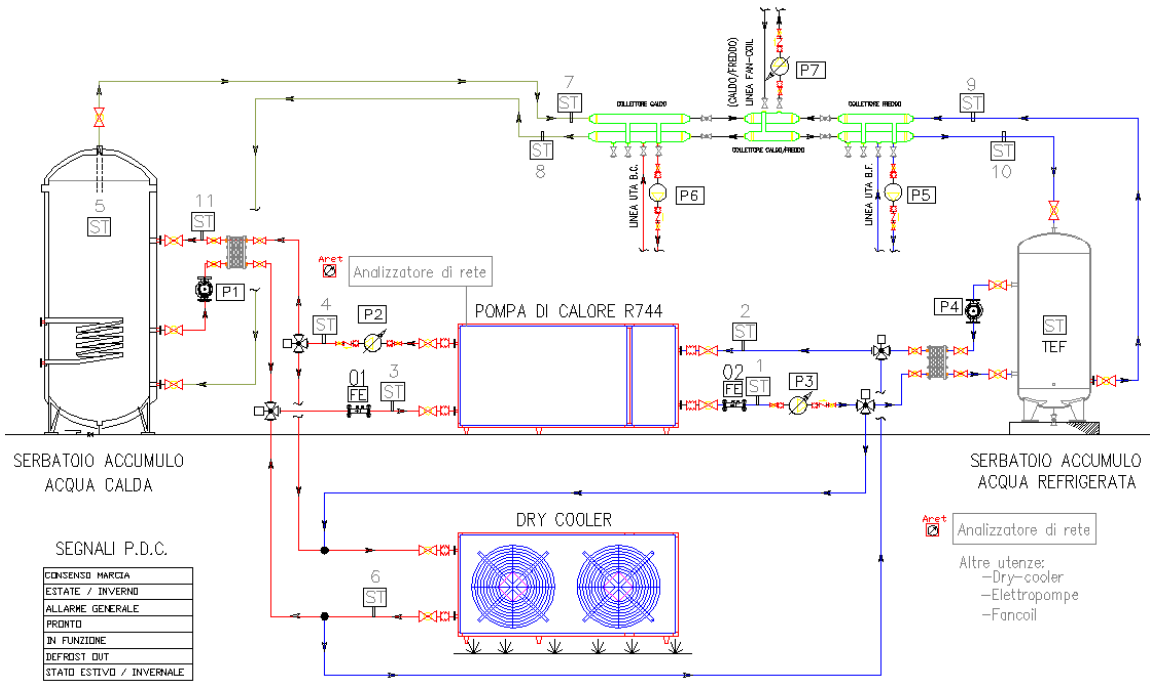
A.2 Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione della pompa di calore a CO_2

L'obiettivo prevede la progettazione, realizzazione e analisi sperimentale di una pompa di calore che utilizza come refrigerante l'R744 (CO_2) [Report RdS/2012/123]. La pompa di calore è del tipo acqua-acqua polivalente e produce un fluido termovettore a servizio di un impianto di climatizzazione estiva ed invernale ad aria primaria e fan coil. L'impianto servito dalla pompa di calore è individuato dall'acronimo AI.CO.WA (AIr Conditioning with HP CO_2 WAter-water). La caratterizzazione della macchina è stata effettuata attraverso un'apposita facility di prova a servizio di un edificio sperimentale, altamente strumentato (Figura 339). L'obiettivo è quello di valutare le prestazioni, quindi il COP e l'EER, della pompa di calore durante il funzionamento invernale (riscaldamento ambiente) ed estivo (raffrescamento ambiente).

Figura 339. Impianto AI.CO.WA con pompa di calore a CO_2 prototipo ENEA

La macchina ha una potenza termica di 30 kWth e una potenza frigorifera di 27 kWf e produce acqua calda e acqua refrigerata da utilizzarsi per coprire i fabbisogni termici legati alla climatizzazione annuale del locale di prova. Il soddisfacimento del carico termico avviene ad opera di fan coil del tipo a cassette e di un'Unità di Trattamento Aria (UTA) dotata di un recuperatore rotativo entalpico che ha lo scopo di garantire il corretto ricambio d'aria degli ambienti (secondo quanto previsto dalla UNI 10339). L'impianto, l'ambiente esterno e quello interno vengono costantemente monitorati mediante il controllore BX EISTEIN, che acquisisce e rielabora le grandezze rilevate dagli strumenti di misura. Il controllo della pompa di calore avviene attraverso il sistema TelevisNet che permette la

gestione e il monitoraggio da computer, fornendo i dati necessari al tracciamento del ciclo termodinamico svolto dalla CO_2.



ST1	Temperatura Acqua uscita Evaporatore PDC [°C]
ST2	Temperatura Acqua ingresso Evaporatore PDC [°C]
ST3	Temperatura Acqua ingresso Gas Cooler PDC [°C]
ST4	Temperatura Acqua uscita Gas Cooler PDC [°C]
ST5	Temperatura Acqua Accumulo caldo [°C]
FE01	Portata Acqua ingresso Gas Cooler PDC [m^3/h]
FE02	Portata Acqua uscita Evaporatore PDC [m^3/h]

Figura 340. Schema impianto AI.CO.WA situato presso il CR ENEA Casaccia (Roma)

Pompa di calore a R744

La pompa di calore utilizza come fluido refrigerante la CO_2 in sostituzione dei tradizionali refrigeranti, altamente inquinanti e nocivi per il buco dell'ozono. La CO_2 ha infatti potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) nullo e potenziale di riscaldamento globale (GWP) unitario. La macchina dispone di due circuiti, uno principale e uno secondario (o economizzatore) e utilizza tre compressori semiermetici ad olio, di cui due compressori principali ON/OFF e un compressore ausiliario dotato di inverter per il circuito economizzatore. In inverno, la macchina funziona fino a quando la temperatura dell'acqua dell'accumulo caldo raggiunge il valore di set point e, in estate, fino a quando l'accumulo freddo raggiunge la temperatura di set point fissato.

La pompa di calore è dotata di cinque differenti scambiatori di calore:

- un gas cooler, del tipo a piastre compatto;
- un evaporatore, del tipo a piastre compatto;
- un sottoraffreddatore di liquido, del tipo compatto a piastre;
- un surriscaldatore del gas in aspirazione ai due compressori del circuito principale, del tipo a fascio tubiero;
- un surriscaldatore del gas in aspirazione al compressore del circuito economizzatore, del tipo a fascio tubiero.

Il circuito frigorifero principale comprende i due compressori, il separatore d'olio, il gas cooler, la valvola di laminazione ICMTS, l'evaporatore, il ricevitore di liquido e il primo scambiatore a fascio tubiero. La temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3 gestisce l'accensione e lo spegnimento di tutti e tre i compressori nel funzionamento invernale, mentre agisce solo sul compressore con inverter nel caso estivo. A differenza di quanto accade nel caso invernale, durante il funzionamento estivo i due compressori di tipo ON/OFF sono infatti gestiti dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore ST2. Il circuito frigorifero secondario invece, comprende il compressore con inverter, il separatore d'olio, il gas cooler, la valvola di laminazione ridotta JKV, il

sottoraffreddatore ed il secondo scambiatore a fascio tubiero. Il compressore gestito dall'inverter si attiva quando l'acqua in ingresso al gas cooler raggiunge 35 °C. Il circuito frigorifero secondario ha lo scopo di realizzare uno scambio interno al ciclo, cioè sottoraffreddare la CO_2 all'uscita del gas cooler prima dell'ingresso in valvola di laminazione. Questa configurazione permette di migliorare le prestazioni della pompa di calore nelle condizioni di funzionamento più sfavorevoli, ossia quando l'acqua in ingresso al gas cooler ha una temperatura elevata (35 - 55 °C).

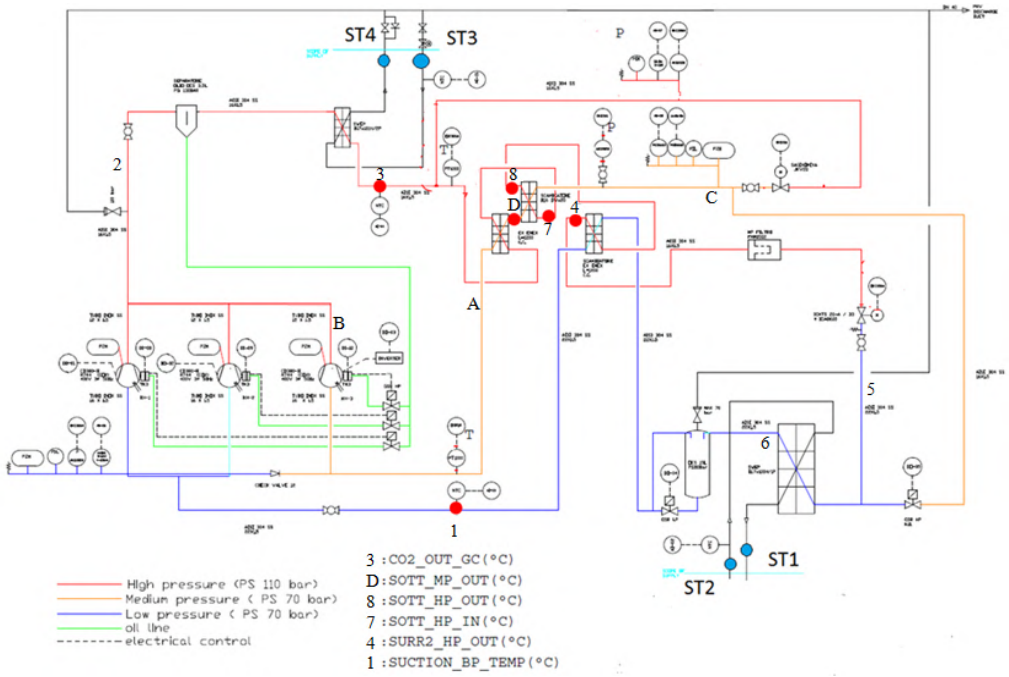


Figura 341. Pompa di calore a CO_2 prototipo ENEA: schema funzionale

Rilievo ed analisi dati sperimentali

I dati sperimentali riportati costituiscono la prima campagna sperimentale condotta per il funzionamento invernale ed estivo della pompa di calore. Tale attività di ricerca ha evidenziato i parametri che maggiormente incidono sulle prestazioni della macchina, ed ha permesso di approfondire la caratterizzazione termodinamica e il funzionamento dei vari componenti della pompa di calore. L'analisi congiunta dei dati invernali ed estivi ha infatti permesso di individuare in ST3 il parametro che regola globalmente il funzionamento della macchina cioè sia nel funzionamento invernale che in quello estivo. I punti sperimentali ottenuti sono stati rielaborati ed analizzati in base a tale temperatura.

I dati sperimentali relativi al lato acqua sono stati acquisiti con il controllore BX EISTEIN mentre con il sistema TelevisNet per quanto concerne le grandezze relative al ciclo termodinamico svolto dalla CO_2.

I rilievi invernali si riferiscono a 187 punti sperimentali relativi ai giorni compresi tra il ventidue dicembre 2011 ed il sette gennaio 2012. I dati relativi all' intervallo di campionamento considerato sono abbastanza significativi perché essi derivano da una particolare strategia tale per cui il serbatoio di accumulo risulti scarico all'avviamento dell'impianto vale a dire che la temperatura dell'acqua del serbatoio di accumulo sia intorno a 20 °C. Così facendo è stato possibile monitorare e descrivere le prestazioni della pompa di calore su un range di temperatura abbastanza ampio. I rilievi estivi si riferiscono a 393 punti sperimentali relativi ai giorni compresi tra il 29 agosto 2012 ed il 16 settembre 2012.

Le condizioni operative rilevate per l'intero periodo di monitoraggio sono riassunte in Tabella 69. La variazione delle grandezze costituenti le condizioni al contorno sono riportate invece in Tabella 70.

Tabella 69. Condizioni operative

Grandezza rilevata	Funzionamento invernale
Pressione al Gas Cooler – HPm,[bar]	57,6 - 96
Pressione di evaporazione – LP, [bar]	30,4 – 40,5
Pressione media – MP, [bar]	31,4 – 56,5
Temperatura in uscita gas cooler- CO_2 OUT GC, [°C]	19,6 - 53

Tabella 70. Variazione delle condizioni al contorno

Grandezza rilevata	Funzionamento invernale	Funzionamento Estivo
Portata massica dell'acqua all'evaporatore-FE02, [m^3/h]	3,1 – 3,7	3,4 – 3,5
Portata massica dell'acqua al GasCooler-FE01, [m^3/h]	2.8 – 2.9	2.4 – 2.7
Temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore-ST2, [°C]	[+1,2 , +10,4]	[+10 ; +21,3]
Temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler-ST3, [°C]	[+18,8 , +52,9]	[+19,3;+67,8]
Temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore-ST1, [°C]	[-2,15 , +6,8]	[6,6 ; +18,2]
Temperatura dell'acqua in uscita dal gas cooler-ST4, [°C]	[+22,9 , +58,85]	[+24,1 ; +72,9]

Le prestazioni della pompa di calore vengono espresse attraverso il COP (Coefficient of Performance) funzione della potenza termica scambiata al gas cooler e attraverso l'EER (Energy Efficiency Ratio) funzione della potenza frigorifera fornita all'evaporatore.

Il funzionamento della pompa di calore dipende dai valori di pressione raggiunti dalla CO_2 all'interno della macchina i quali determinano il posizionamento del ciclo termodinamico nel piano pressione-entalpia. Il posizionamento e la conformazione di tale ciclo definiscono il COP e l'EER della macchina in quanto agiscono sulla potenza termica scambiata al gas cooler e su quella frigorifera fornita all'evaporatore. L'andamento dell'alta pressione è abbastanza rappresentativo del funzionamento della pompa di calore: essa presenta un andamento prevalentemente crescente all'aumentare della temperatura ST3 in quanto man mano che tale temperatura cresce deve aumentare la temperatura della CO_2 in uscita da quest'ultimo, collocando quindi l'intero ciclo a pressioni maggiori.

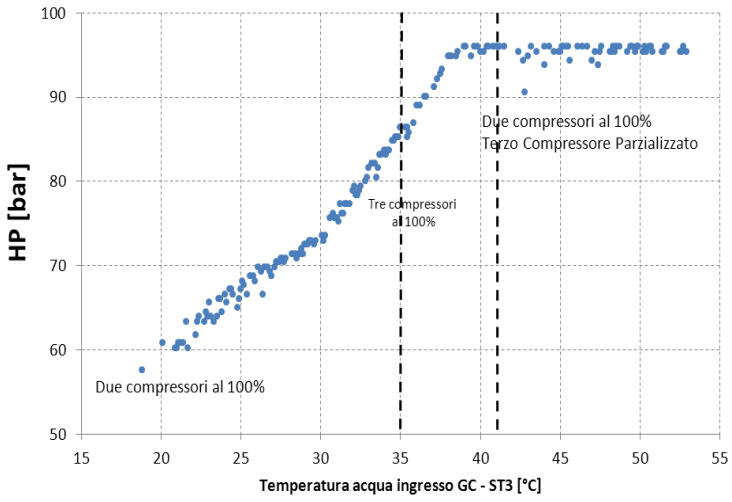


Figura 342. Andamento della pressione al gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC (Funzionamento Invernale)

La presenza del circuito ausiliario è responsabile dell'andamento dell'alta pressione per temperature ST3 maggiori di 35°C. Infatti, come è possibile vedere dal grafico, dopo un certo valore di pressione, la pressione al gas cooler si attesta attorno al valore di 95-96 bar senza aumentare ulteriormente nonostante la temperatura ST3 aumenti. Questo comportamento è dettato da una scelta di tipo impiantistico: per motivi di sicurezza, una volta che la pressione al gas cooler ha raggiunto il valore di circa 96 bar, l'inverter interviene in modo da stabilizzare la pressione al gas cooler su quei valori e non correre il rischio di arrivare a livelli di pressione troppo elevati. La bontà dello scambio termico tra acqua e CO_2 è indagabile attraverso l'andamento della temperatura della CO_2 in uscita dal gas cooler in funzione della temperatura dell'acqua in uscita sempre da tale scambiatore (ST4). Tale andamento è lineare e crescente all'aumentare della ST4 (o della ST3) ed è legato all'aumento della pressione al gas cooler con ST3. Tale andamento lineare testimonia il fatto che il profilo termico dell'anidride carbonica riesce bene a seguire il profilo di temperatura dell'acqua.

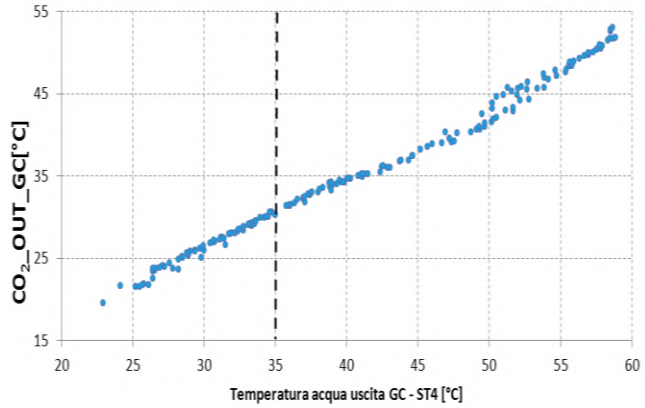


Figura 343. Andamento della temperatura della CO_2 in uscita dal Gas Cooler in funzione della temperatura dell'acqua in uscita dal Gas Cooler (Funzionamento invernale)

La potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore dipende dal numero di compressori in funzionamento a sua volta stabilito dalla sola temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3 in funzionamento invernale e anche dalla temperatura ST2 in funzionamento estivo. Quando funzionano esclusivamente i due compressori di tipo ON/OFF si ha un andamento crescente della potenza elettrica assorbita al crescere della ST3, andamento quest'ultimo attribuibile alla variazione della pressione al gas cooler, sempre al crescere della temperatura ST3 (Figura 344).

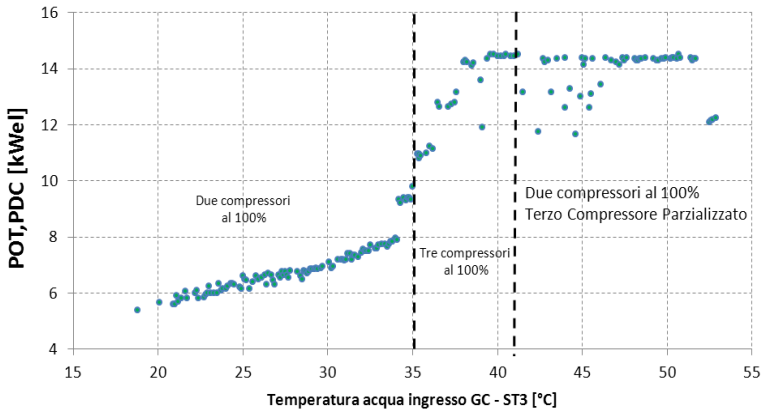


Figura 344. Andamento della potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC (Funzionamento Invernale)

L'attivazione del compressore sotto inverter (ST3 = 35 °C), determina un brusco aumento della potenza elettrica assorbita dalla macchina rintracciabile facilmente sul grafico. Una volta raggiunto un certo valore di ST3, e quindi di pressione al gas cooler, per motivi di sicurezza l'inverter interviene parzializzando il funzionamento del terzo compressore. L'inverter stabilizza il funzionamento del terzo compressore determinando un assorbimento elettrico pressoché costante da parte della macchina.

Il COP è il rapporto tra l'effetto utile prodotto, cioè la potenza termica scambiata al gas cooler, e la potenza elettrica assorbita dalla macchina necessaria per produrre tale effetto utile. Di conseguenza l'andamento del COP dipende dall'andamento della potenza termica scambiata al gas cooler e di quella elettrica assorbita dalla macchina.

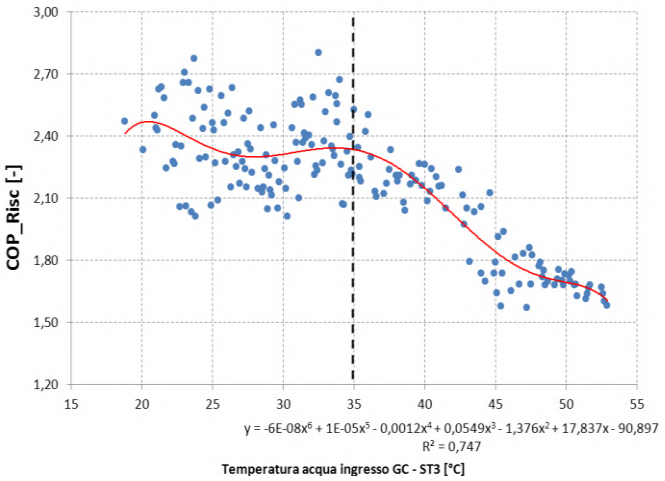


Figura 345. Andamento del COP in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC (Funzionamento invernale)

Nel funzionamento invernale, il COP presenta un comportamento crescente per ST3 minore di 20 °C in quanto la potenza termica scambiata al gas cooler subisce per tale range di temperature un incremento.

Quando ST3 raggiunge i 35 °C entra in funzione il terzo compressore e quindi il circuito ausiliario causando un aumento della potenza elettrica assorbita che determina un andamento decrescente del COP all'aumentare della ST3. La presenza del circuito ausiliario comporta un abbassamento del COP inferiore al caso in cui tale circuito non sarebbe presente.

Oltre ai punti sperimentali, il grafico del COP invernale presenta una curva di approssimazione polinomiale (sesto grado) la cui equazione e coefficiente di correlazione sono riportati direttamente sul grafico stesso.

La macchina raggiunge il COP invernale massimo di 2,80 per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di 32,5 °C, minore di 35 °C (funzionamento invernale). Il COP invernale diminuisce a partire da temperature maggiori di 35°C per poi raggiungere il suo valore minimo di 1,57 in corrispondenza di 47,2 °C.

Nel funzionamento estivo, le prove corrispondenti a temperature ST3 minori di 39 °C sono caratterizzate dalla dissipazione dell'energia termica prodotta dalla pompa di calore attraverso il dry cooler e ad esse corrisponde quindi un COP fittizio. Per valori di ST3 minori di 39 °C, il COP estivo presenta un andamento decrescente in quanto la potenza elettrica assorbita dalla macchina ha un andamento crescente con pendenza maggiore rispetto a quella della potenza termica scambiata al gas cooler.

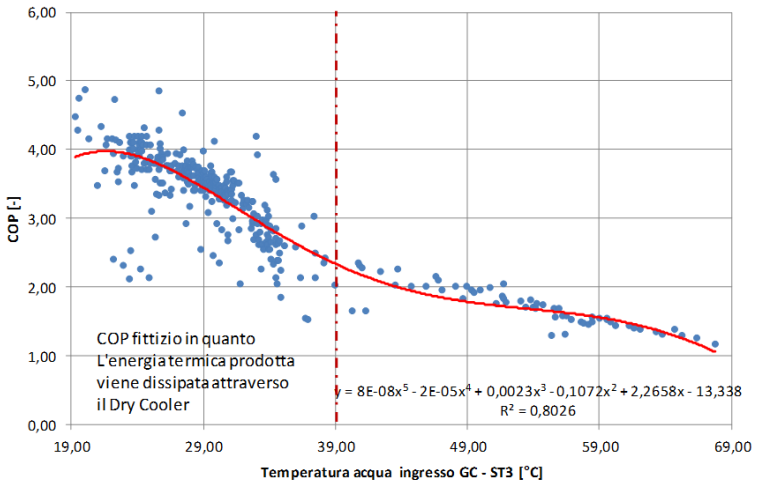


Figura 346. Andamento del COP in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC (Funzionamento Estivo)

I punti sperimentali ottenuti per ST3 maggiore di 39°C sono relativi a prove effettuate secondo una precisa logica: è stata imposta l'esclusione del dry cooler e la macchina è stata avviata quando sia il serbatoio di accumulo caldo

che quello freddo sono risultati opportunatamente scarichi (ST5 ≈36 °C e STTEF ≈20°C). In tale configurazione l'energia termica e frigorifera prodotte dalla macchina non vengono dissipate in quanto l'acqua calda e refrigerata così prodotte vengono stoccate nei rispettivi serbatoi di accumulo. Oltre ai punti sperimentali, il grafico del COP estivo presenta una curva di approssimazione polinomiale di quinto grado la cui equazione e coefficiente di correlazione vengono riportati direttamente sul grafico stesso. Il COP oscilla globalmente tra un valore minimo di circa 1,16 ed un massimo di 4,86 (per ST3 = 20,1 °C) attestandosi a valori maggiori di 2 per temperature inferiori a 35 °C e a valori inferiori a 2 per temperature ST3 maggiori di 49 °C. L'EER è il rapporto tra l'effetto frigorifero utile prodotto, cioè la potenza frigorifera scambiata all'evaporatore, e la potenza elettrica assorbita dalla macchina necessaria per produrre tale effetto utile. Di conseguenza l'andamento dell'EER dipende dall'andamento della potenza frigorifera scambiata all'evaporatore e di quella elettrica assorbita dalla macchina. Per valori di ST3 minori di 39 °C, l'EER presenta un andamento decrescente in quanto la potenza elettrica assorbita dalla macchina ha un andamento crescente con pendenza maggiore rispetto a quella della potenza frigorifera scambiata all'evaporatore. I punti per ST3 maggiore di 39°C sono relativi a prove effettuate secondo la particolare logica già precedentemente illustrata nel caso del COP in funzionamento estivo. Oltre ai punti sperimentali, il grafico dell'EER presenta una curva di approssimazione dei dati. La curva scelta per l'approssimazione è un polinomio di quinto grado la cui equazione e coefficiente di correlazione vengono riportati direttamente sul grafico stesso. L'EER oscilla globalmente tra un valore minimo di 0,17 ed un massimo di 4,81 per una temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler di 25,7 °C, minore di 35 °C.

In particolare, l'EER decresce con pendenza minore a partire da ST3 pari a circa 40 °C in quanto vengono sfruttati gli effetti positivi dell'attivazione del circuito di media pressione ovvero il raffreddamento della CO_2 in uscita dal gas cooler e l'ulteriore contributo in termini di portata fornito dal terzo compressore.

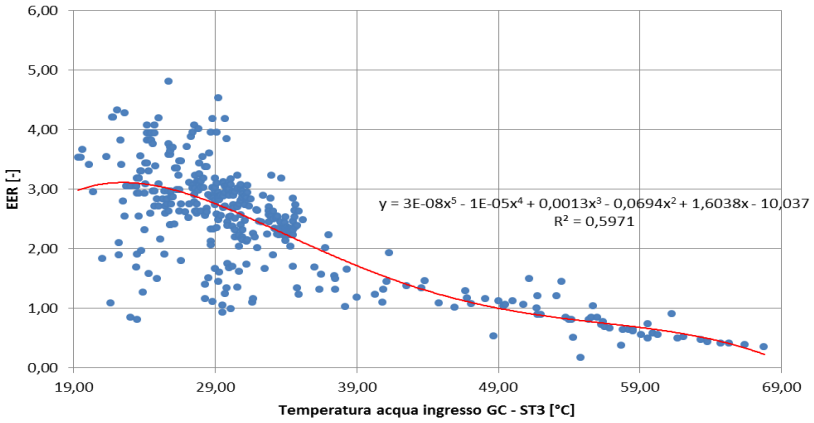


Figura 347. Andamento dell'EER in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso al GC (Funzionamento Estivo)

Conclusioni

Dall'analisi e dalla rielaborazione dei dati sperimentali invernali ed estivi risulta che maggiore è la temperatura dell'acqua in ingresso al gas cooler ST3 peggiori sono le prestazioni della macchina, quindi la temperatura di ritorno dell'acqua dall'impianto, o dal circuito servito, alla pompa di calore ne determina fortemente il COP e l'EER.

Nel funzionamento invernale, a causa della logica di funzionamento della macchina, il ruolo di tale temperatura è ancora più decisivo perché essa determina l'attivazione e la disattivazione dei compressori della pompa di calore e quindi il suo funzionamento. Un elevato COP per una pompa di calore a CO_2 a singolo stadio senza recupero dell'energia di espansione, può essere ottenuto soltanto se la CO_2 ha una temperatura in ingresso al gas cooler relativamente bassa. Questo presuppone quindi che il fluido secondario, ovvero l'acqua, abbia una temperatura bassa all'ingresso nel gas cooler.

La sperimentazione nel periodo invernale di tale pompa di calore evidenzia come sia importante la scelta dei terminali da abbinare alla macchina: essi devono essere in grado di assicurare una bassa temperatura di ritorno dall'impianto in modo da migliorare le prestazioni della macchina. È opportuno quindi studiare una strategia adeguata di regolazione o selezionare degli opportuni terminali d'impianto ad elevato salto termico, cercando di mantenere la temperatura ST3 al di sotto dei 35 °C. Dall'analisi dei dati sperimentali risulta infatti evidente che una maggiore temperatura dell'acqua in ingresso alla macchina corrisponde ad un peggioramento delle prestazioni della PDC e quindi ad un abbassamento del COP, soprattutto se ST3 è maggiore di 35 °C.

La pompa di calore, in un eventuale intervento di riqualificazione energetica di un edificio esistente o di pregio storico, è sicuramente in grado di alimentare un tradizionale radiatore che necessita di una temperatura in ingresso compresa tra 70 °C e 60 °C, in funzione della temperatura dell'aria esterna. Bisogna però porre particolare attenzione alla temperatura dell'acqua di ritorno in macchina che deve essere necessariamente inferiore a 35 °C per ottenere un COP significativo. L'evoluzione delle strategie di termoregolazione dei "vecchi" radiatori consentirà sicuramente l'ottenimento di terminali ad elevato salto termico. Nel caso di nuovi edifici e quindi di nuovi impianti, questa macchina si sposa evidentemente molto bene ad impianti di tipo radiante che tipicamente lavorano con un elevato salto termico.

L'analisi dei dati estivi ha evidenziato l'importanza della temperatura ST3 anche per quanto riguarda il funzionamento estivo della pompa di calore. Così come accade nel caso invernale, ST3 stabilisce il funzionamento del compressore sotto inverter mentre i due compressori di tipo ON/OFF sono gestiti dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore ST2. In realtà tale temperatura, e quindi le condizioni che si hanno all'evaporatore, è legata alla temperatura ST3, cioè alle condizioni raggiunte invece al gas cooler. Garantendo una temperatura ST3 prossima a 30 °C si ha un EER della macchina pari a circa 3: in funzionamento polivalente, la macchina dovrà produrre acqua calda a temperature superiori a 30 °C solo nel caso ci sia una richiesta di quest'ultima. In assenza di richiesta di carico termico (es. produzione acqua calda sanitaria, sterilizzazione in applicazioni dell'industria alimentare, etc.) sarà sicuramente conveniente dissipare l'energia termica prodotta dalla pompa di calore mediante l'utilizzo di un dry-cooler, senza fornire apporto termico al serbatoio di accumulo caldo.

In conclusione, risulta necessario fornire l'acqua in ingresso alla pompa di calore lato gas cooler in condizioni opportune tali da garantire un efficiente scambio termico tra acqua e anidride carbonica e un basso assorbimento elettrico: questo si traduce in inverno nel garantire una ST3 inferiore a 35 °C ed in estate, qualora non ci sia necessità di energia termica, nel mantenere ST3 al di sotto dei 30 °C.

A.3 Progettazione costruttiva di un prototipo di pompa di calore a CO_2 (R744) invertibile del tipo aria-aria e realizzazione della facility di prova

La climatizzazione di grandi locali commerciali e grossi edifici del terziario (ad esempio sale cinema) è realizzata anche con sistemi roof-top, montati sul tetto dell'edificio e collegati alla rete di distribuzione dell'aria condizionata. Tali sistemi sono particolarmente semplici nell'istallazione nel caso di grandi ambienti da climatizzare accessibili direttamente dal tetto e che richiedono una rete di distribuzione breve e su poche utenze. Essi infatti prevedono solo l'allaccio alla rete di distribuzione dell'energia elettrica; inoltre non necessitano dell'uso di fluidi termo vettori, utilizzando scambiatori di calore aria/refrigerante (batterie di tubi alettati, dette comunemente batterie).

Nel loro funzionamento in modalità riscaldamento può essere necessario sbrinare la batteria esterna in funzione delle condizioni dell'ambiente esterno e di carico della macchina; la frequenza e la durata degli sbrinamenti aumenta in climi severi e con alti tassi di umidità. Lo sbrinamento è spesso realizzato con resistenze elettriche collocate sulla superficie della batteria; solo talvolta, è utilizzato lo sbrinamento a gas caldo (nelle sue varie modalità meglio descritte di seguito) in quanto tale soluzione richiede delle complicazioni sul circuito lato refrigerante rispetto al ciclo termodinamico di base. Durante la fase di sbrinamento la continuità del riscaldamento viene garantita da sistemi integrativi quali resistenze elettriche o acqua calda proveniente, ad esempio, da una caldaia.

Dal punto di vista dei consumi energetici, la fase di sbrinamento riduce il coefficiente di prestazione medio stagionale della pompa di calore; tale riduzione è tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza e la percentuale di tempo di funzionamento totale occupata dalla fase di sbrinamento (entrambe più alte nel caso di climi severi e con alti tassi di umidità, e con sbrinamento elettrico).

Di conseguenza, in climi severi e umidi, nella stagione invernale tali sistemi roof-top hanno una sensibile riduzione delle prestazioni energetiche a causa della fase di sbrinamento con aggravio dei costi di funzionamento e impianti più articolati da un punto di vista costruttivo rispetto agli stessi sistemi operanti in climi più miti (ad esempio, utilizzo caldaia ausiliaria).

Si è ritenuto pertanto interessante studiare sperimentalmente pompe di calore reversibili aria/aria del tipo roof-top che consentano di ridurre la durata e la frequenza dello sbrinamento anche in climi severi, utilizzando la sola energia elettrica, in modo da salvaguardare la semplicità dell'istallazione.

Inoltre si intende utilizzare come fluido di lavoro l'anidride carbonica, dal momento che questo fluido è normalmente presente in natura e quindi presenta un basso impatto ambientale rispetto ai fluidi di sintesi (miscele di HFC) normalmente utilizzati in queste applicazioni. In tal modo la maggiore temperatura di mandata

del compressore per la CO_2 rispetto ad altri fluidi comunemente utilizzati (R404A, R410A) dovrebbe consentire tempi di sbrinamento più brevi con l'adozione di uno sbrinamento a gas caldo.

Nel dettaglio, si è deciso di progettare una pompa di calore aria/aria a CO_2 reversibile per la climatizzazione di locali commerciali, con potenza nominale di 30 kW, operante in climi severi con portate volumetriche di aria di 6000 m^3/h per la batteria interna e di 8000 m^3/h per la batteria esterna [Report RdS/2012/124].

L'impianto roof-top da progettare, dovendo operare in climi severi, deve prevedere una tecnica di sbrinamento capace di assicurare tempi di ferma molto brevi al fine di limitare l'interruzione di servizio. Visto che l'uso della CO_2 comporta una temperatura media nella fase di cessione di calore all'ambiente esterno maggiore di altri fluidi (a parità di potenza termica resa e temperatura di evaporazione), ci si è orientati verso una tecnica di sbrinamento a gas caldo, che oltre a garantire una minore durata dello sbrinamento, potrebbe consentire anche di conseguire dei risparmi energetici rispetto allo sbrinamento con resistenza elettrica. Inoltre, a causa della bassa temperatura critica della CO_2 il ciclo termodinamico risulta essere di tipo trans critico nella maggior parte delle condizioni di lavoro, con una elevata temperatura di uscita dal gas cooler, per cui l'impianto deve prevedere l'utilizzo di un rigeneratore, al fine di aumentare l'efficienza del ciclo termodinamico. Essendo il fluido termovettore costituito da aria, la reversibilità della pompa di calore si preferisce garantirla tramite inversione del ciclo del refrigerante.

Schema di impianto

Al fine di soddisfare tutti questi requisiti, è stato sviluppato lo schema di impianto riportato in Figura 349, a cui si associa la Tabella 71 con la configurazione delle valvole in base alla modalità di funzionamento del sistema.

Tabella 71. Modalità di funzionamento del roof-top con configurazione delle valvole di impianto

	Configurazione Valvole						
Modalità di funzionamento	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Estate	a	a	/	a	/	/	CHIUSA
Inverno Classico	b	a	b	b	/	/	CHIUSA
Inverno 2 evap. in serie	b	b	b	b	/	/	CHIUSA
Inverno 2 rigenerativi	b	a	a	b	/	/	CHIUSA
Defrosting classico	b	a	b	b	100%	/	APERTA
Defrosting 2 rigenerativi	b	a	a	b	100%	/	APERTA
Defrosting inverso	a	b	/	a	100%	100%	APERTA

Dalla Figura 348 è possibile osservare la presenza delle due circuiti in parallelo rispetto al refrigerante e in serie rispetto all'aria per le batterie esterne, la presenza di due rigeneratori per garantire il loro utilizzo indipendentemente dall'inversione del ciclo

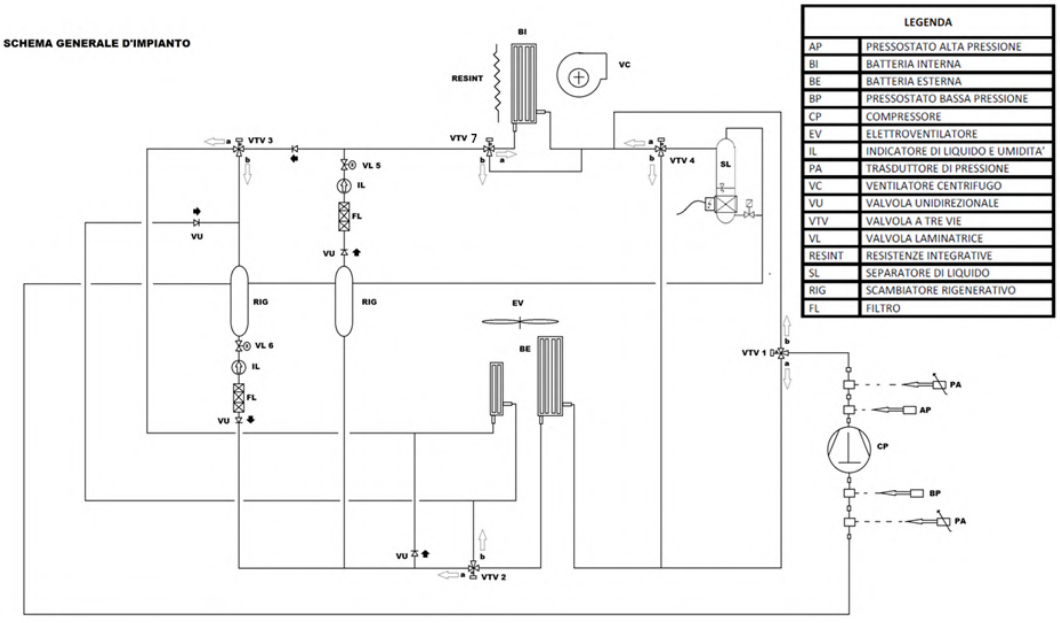


Figura 348. Schema frigorifero Roof Top ad R744 in pompa di calore

Algoritmo per la modellazione fisica

Per la progettazione del *roof-top* a CO_2 è stato creato ad hoc un modello fisico successivamente implementato in ambiente Matlab in grado di simulare il funzionamento di un sistema come quello precedentemente rappresentato, cogliendone le principali peculiarità: ciclo termodinamico transcritico a CO_2, batterie principali per lo scambio termico ad aria forzata, necessità di tener conto della de-umidificazione nel funzionamento estivo, controllo della pressione massima del ciclo in funzione dell'ottimizzazione vincolata del COP fino ad una pressione massima di 100 bar, presenza di scambiatori rigenerativi e inversione del ciclo. Il codice creato richieste come input gli stessi richiesti dal normale funzionamento di un sistema ROOF-TOP: temperatura dell'aria interna (T_{IN}) ed esterna (T_{EXT}), rispettive umidità specifiche (ω_{IN} ed ω_{EXT}) e portate volumetriche.

A titolo esemplificativo in Figura 349 si riportano alcuni output in funzione della temperatura di evaporazione e della temperatura di uscita dal gas cooler.

Di seguito si riassume l'algoritmo seguito. Assegnate le condizioni al contorno sull'aria (T_{IN}, $T_{EXT,}$ ω_{IN}, ω_{EXT}) e le portate volumetriche, nota la geometria di tutti i componenti e il numero di giri del compressore, l'algoritmo calcola in un dominio di valori della coppia T_{EV} e di T_{GC_OUT} i corrispondenti valori della potenza termica fornita dalle batterie (P_{EV} e P_{GC}). Conseguentemente, per le condizioni al contorno agli scambiatori di calore finora note, il codice di calcolo determina la temperatura dell'aria in ingresso agli scambiatori di calore affinché la potenza termica calcolata con l'equazione dello scambio termico coincida con quella calcola con il bilancio di prima legge.

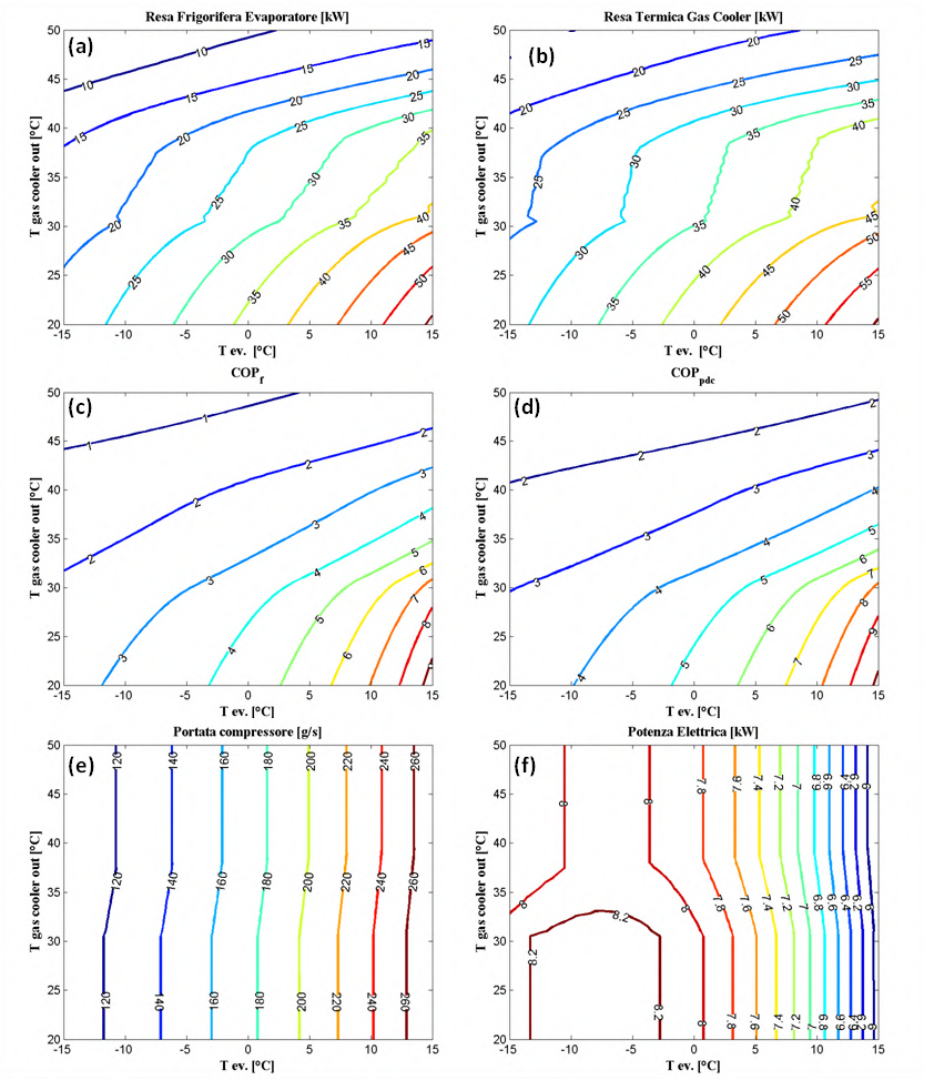


Figura 349. Curve di isolivello in funzione della temperatura di evaporazione, T ev, e della temperatura di uscita dal gas cooler, T gas cooler out, delle seguenti grandezze: resa frigorifera evaporatore (a), resa termica gas cooler (b), COP in modalità di funzionamento estivo COP_f (c), COP in modalità di funzionamento invernale COP_{pdc} (d), portata massica del compressore (e), potenza elettrica al compressore (f)

Per fare ciò, l'algoritmo, ha determinato per ciascuna batteria, il luogo di punti in verde riportato in Figura 350a) per la batteria interna e in Figura 350b per la batteria esterna. In questo luogo di punti esisterà al limite una linea di punti che corrispondono alle condizioni al contorno fissate in termini di temperatura dell'aria in ingresso (piani arancione in Figura 350a e b).

Dall'intersezione della proiezione delle due curve sul piano T_{EV} e T_{GC_OUT} (Figura 350c) si ricavano le due temperature soluzione (T_{EV}* e T_{GC_OUT}*) per il punto di funzionamento considerato (cerchiato in rosso in Figura 351c).

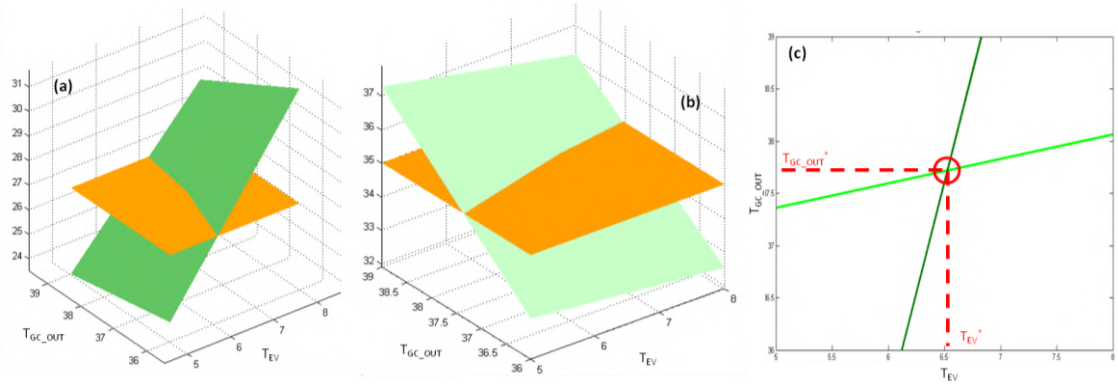


Figura 350. (a) P_{EV} in funzione della T_{EV} e della T_{GC_OUT} (piano verde) e temperatura dell'aria in ingresso all'evaporatore (piano arancione); (b) P_{GC} in funzione della T_{EV} e della T_{GC_OUT} (piano verde) e temperatura dell'aria in ingresso al gas cooler (piano arancione)

Lo strumento di modellazione appena descritto è stato utilizzato per condurre un'analisi parametrica al variare delle dimensioni dei componenti compressore, batteria interna, batteria esterna e scambiatore rigenerativo; i risultati di questa analisi hanno consentito di selezionare tra i prodotti esistenti in commercio o costruiti ad hoc i componenti di seguito descritti per la realizzazione dell'impianto.

Previsioni di funzionamento in condizioni nominali e in off-design

Le condizioni nominali scelte per le simulazioni, sia in modalità di funzionamento estivo che in invernale, sono quelle più ricorrenti nell'ambito della progettazione di impianti di climatizzazione per un clima tipico del territorio italiano, mentre le condizioni di funzionamento diverse da quelle nominali sono state scelte in modo da mettere in evidenza possibili problematiche o criticità che potrebbe interessare uno o più componenti del sistema.

Tutte le simulazioni sono state condotte ad una pressione massima del ciclo pari a 100 bar. Per le condizioni in cui si è verificato che la temperatura di mandata del compressore superasse i 100 °C, le simulazioni sono state ripetute fissando una pressione massima del ciclo pari a 85 bar. Questo abbassamento di pressione è stato ritenuto opportuno in quanto il valore di temperatura di mandata di 100 °C può essere considerato come valore limite a causa dell'acidificazione dell'olio lubrificante.

In Figura 351 sono riportati i limiti di temperatura dell'aria esterna T_{EXT} ed interna T_{IN} investigati per le varie simulazioni nel caso di funzionamento estivo (a) e invernale (b).

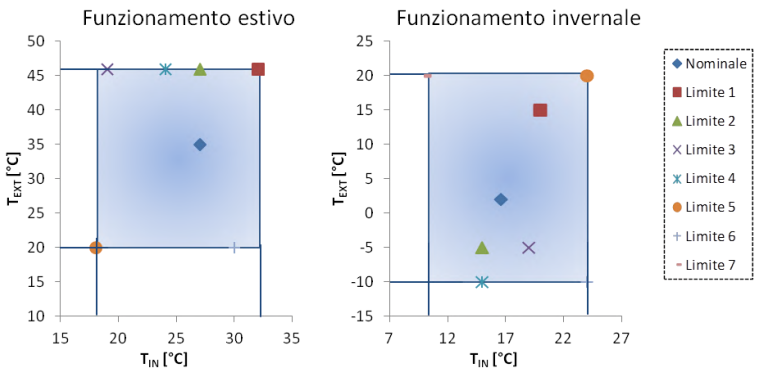


Figura 351. Limiti di funzionamento investigati per la temperatura dell'aria interna TIN e dell'aria esterna TEXT nel caso estivo (a) e invernale (b). Il caso Limite 7 nella legenda si ha solo nel funzionamento invernale

Nel funzionamento estivo, fissata la cilindrata del compressore ed il suo numero di giri, la resa frigorifera più alta (35,1 kW) si osserva per la simulazione alla quale corrispondono un valore del COP pari a 3,8, un valore minimo della T_{EXT} pari a 20 °C ed un valore massimo della T_{IN} pari a 30 °C. Dai dati delle simulazioni è stato possibile ricavare il grafico mostrato in Figura 352, che riporta la potenza frigorifera P_f al variare della T_{IN}, per due differenti valori della temperatura T_{EXT}.

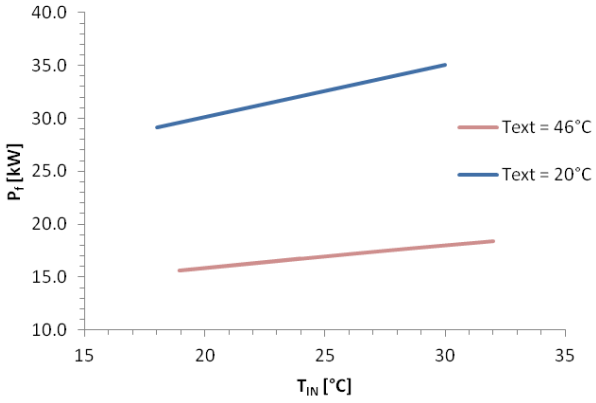


Figura 352. Andamento della potenza frigorifera P_f al variare della temperatura dell'aria della batteria interna T_{IN} parametrico nella temperatura dell'aria della batteria esterna T_{EXT}

Per le simulazioni condotte in modalità di funzionamento invernale si nota che la massima potenza termica fornita dalla batteria interna all'aria da climatizzare si attesta intorno ai 30,6 kW, verificatasi nella simulazione per la quale si ha un valore T_{IN} = 10 °C con una umidità relativa del 50% , e T_{EXT} = 20 °C con una umidità relativa del 50%. Tale simulazione è caratterizzata dal massimo valore del COP pari a 3,4. Dai dati delle simulazioni effettuate è stato ricavato il grafico riportato in Figura 353, che mostra l'andamento della potenza termica P_t in funzione della T_{IN}, parametrico nella T_{EXT}.

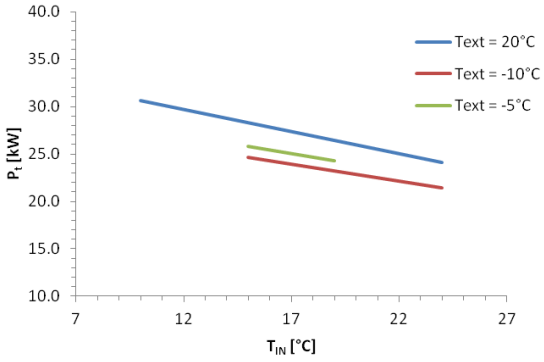


Figura 353. Andamento della potenza termica in funzione della temperatura dell'aria della batteria interna TIN parametrico nella temperatura dell'aria della batteria esterna T_{EXT}

Lay-out roof top

In Figura 354 è riportato il lay-out della macchina frigorifera in tre dimensioni.

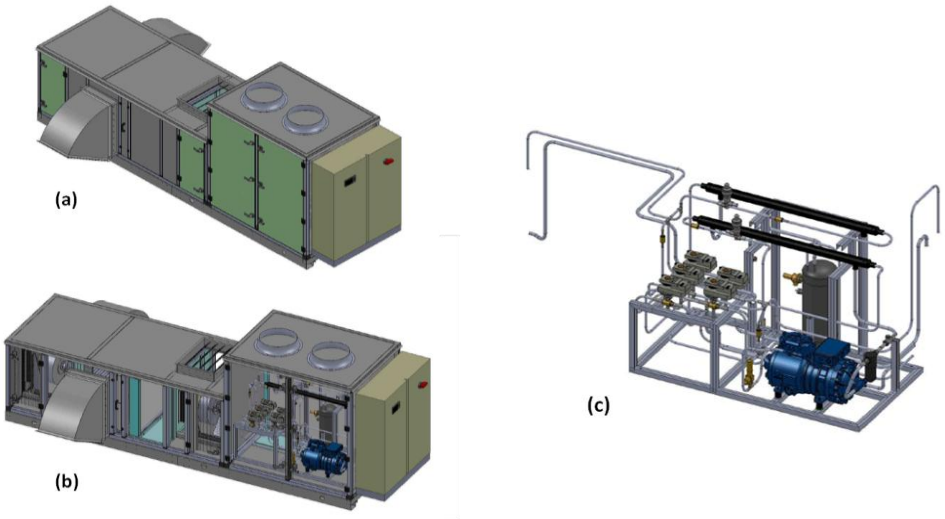


Figura 354. (a) Vista tridimensionale del roof-top, (b) vista tridimensionale in trasparenza, (c) particolare del circuito

E’ stato progettato e realizzato l’impianto a servizio del roof-top (Figura 355) che costituisce la facility di test della macchina frigorifera: l’impianto serve un edificio di superficie complessiva pari a circa S=215 m^2 avente destinazione d’uso “uffici” (Edificio F-76).

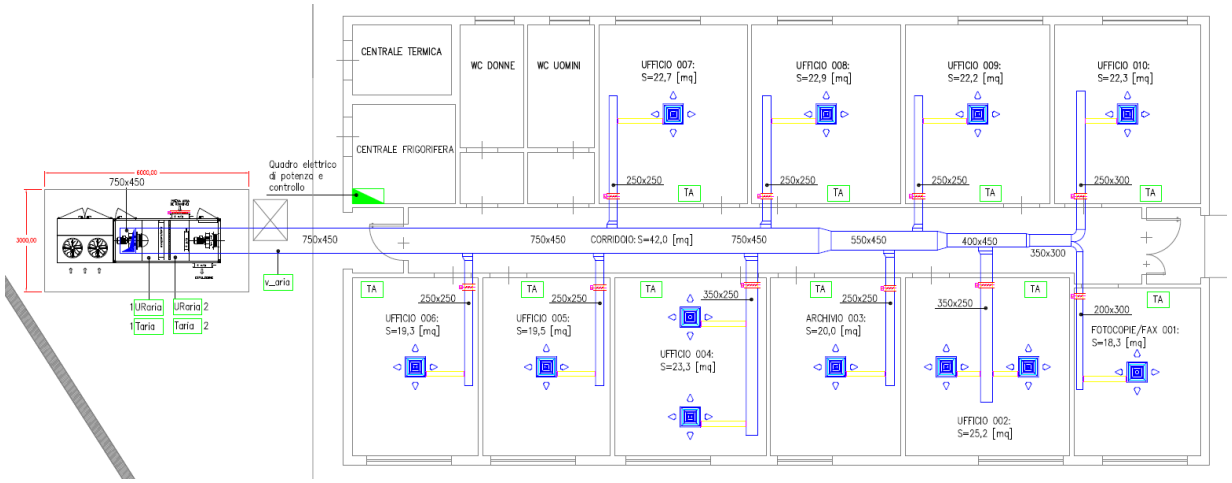


Figura 355. Layout impianto distribuzione aria servito da roof-top

Il roof-top avrà il compito di garantire la climatizzazione sia estiva che invernale dell’edificio ed il suo funzionamento sarà costantemente monitorato al fine di valutarne COP ed EER nelle reali condizioni di funzionamento, testando le differenti circuiteria implementate sulla macchina.

L’impianto è dotato di un evoluto sistema BMS (Building Management System) in grado di gestire le corrette condizioni termoigrometriche dei vari ambienti variando la portata d’aria immessa nei vari locali e modificandone anche la temperatura d’immissione.

Tutti gli apparati di regolazione e controllo che gestiscono il funzionamento del roof top, ne effettuano il monitoraggio, permettono il controllo in remoto del sistema edificio-impianto sono installati all’interno del quadro elettrico di potenza e controllo.

In Figura 356 sono riportate alcune fasi di installazione del roof top.

Figura 356. Installazione del roof-top e collegamento ai canali di mandata e ripresa aria

In Figura 357si riporta il particolare del circuito frigorifero installato a bordo macchina.

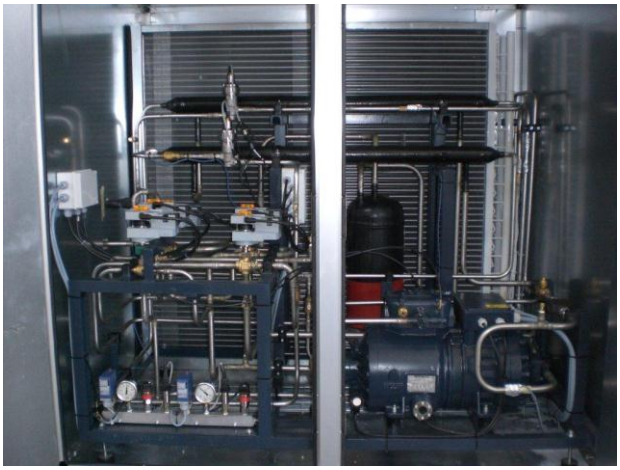


Figura 357. Particolare del circuito frigorifero installato a bordo macchina

Conclusioni

E' stato progettato un sistema roof-top aria/aria reversibile ad anidride carbonica con una potenza nominale in riscaldamento pari a 30 kW.

A seguito di un'analisi dello stato dell'arte circa le soluzioni impiantistiche più recenti per il miglioramento delle prestazioni dello sbrinamento per pompe di calore di media taglia, sono state individuate diverse soluzioni circuitali per realizzare lo sbrinamento a gas caldo.

E' stata curata la progettazione della circuiteria degli scambiatori di calore per consentire l'inversione del ciclo lato refrigerante. Inoltre, il sistema presenta degli scambiatori rigenerativi che consentono di evaporatore il refrigerante proveniente dall'evaporatore allagato e, qualora la temperatura dell'ambiente esterno sia molto alta, di abbassare ulteriormente la temperatura del fluido in uscita dal gas-cooler in modo da aumentare notevolmente il coefficiente di prestazione in modalità estiva.

A seguito della progettazione di massima e della definizione dei componenti è stato verificato l'accoppiamento tra i componenti in condizioni operative fuori progetto, verificando le condizioni operative del sistema che risultano soddisfacenti anche in condizioni climatiche severe. Tale verifica è stata effettuata, in assenza del prototipo realizzato successivamente, tramite un modello fisico e le relative soluzioni tramite un codice di calcolo (riportato in appendice).

I risultati delle simulazioni sono risultati soddisfacenti e successivamente alla realizzazione il corretto funzionamento del sistema è stato verificato presso l'azienda produttrice del prototipo.

E' stato progettato e realizzato l'impianto a servizio del roof-top che costituisce la facility di test della macchina frigorifera: l'impianto serve un edificio di superficie complessiva pari a circa S=215 m^2 avente destinazione d'uso "uffici" (Edificio F-76).

A.4 Progettazione di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase

Oggetto di questa linea di ricerca è la progettazione costruttiva di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase (PCM, *Phase Change Material*). Si tratta di dimensionare in maniera opportuna un prototipo di accumulo di questo tipo a servizio dell'impianto di *solar heating* e *cooling* che assicura la climatizzazione sia estiva che invernale dell'edificio F-92 del C.R. ENEA di Casaccia [Report RdS/2012/125].

L'impianto prevede la presenza di un accumulo sia dal lato "caldo" (interfacciato con il campo solare ed utilizzato sia nella stagione del riscaldamento che in quella del raffrescamento) sia dal lato freddo (utilizzo solo estivo). Per tale ragione si pone il problema di valutare su quale delle seguenti tre opzioni sia maggiormente conveniente fondare il dimensionamento del serbatoio PCM:

a) accumulo caldo di tipo latente progettato per accumulare a T=45 °C (per il riscaldamento invernale degli ambienti);
b) accumulo caldo di tipo latente progettato per accumulare a T=88 °C (per alimentare il gruppo frigo ad assorbimento);

c) accumulo freddo di tipo latente progettato per accumulare a T=7 °C (dedicato alla climatizzazione estiva degli ambienti).

Le simulazioni effettuate hanno avuto lo scopo di capire in quale direzione cambiano le indicazioni di ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell'impianto per ognuno dei tre casi citati. L'idea è quella di scegliere la capacità di accumulo che ottimizzi le prestazioni energetiche e, possibilmente, economiche (massimizzazione del valore attuale netto e minimizzazione del tempo di ritorno dell'investimento). Una volta individuata la capacità ottimale, ed individuata la sostanza PCM in commercio maggiormente adatta all'applicazione, si è verificato il funzionamento dell'impianto con un accumulo a PCM della medesima capacità termica. Tale verifica è stata calcolata sulla scorta delle proprietà del materiale scelto ed esplicitata in termini di numero di ore di copertura della potenza di picco di riscaldamento da parte dell'accumulo stesso, fissate le condizioni al contorno (ad esempio il ΔT fra mandata e ritorno). Si è verificato poi il comportamento della stessa capacità di accumulo nel funzionamento estivo come alimentazione del generatore del *chiller* ad assorbimento, sempre in termini di numero di ore di autonomia di alimentazione. Il dimensionamento finale dell'accumulo deve ovviamente tenere conto del budget a disposizione e di alcuni vincoli costruttivi, con i quali si procede alla costruzione dello stesso presso il fornitore individuato.

Per dimensionare correttamente l'accumulo per le finalità di *solar heating* (e *cooling*) oggetto del presente studio, si è proceduto ad una simulazione dinamica in ambiente TRNSYS del sistema edificio-impianto. Il *time step* utilizzato è stato pari ad un'ora.

Si è quindi modellizzato l'edificio in questione attraverso la descrizione delle sue strutture opache e trasparenti, dei guadagni interni e delle schedulazioni, sulla scorta dei dati forniti da ENEA. Il modello realizzato tiene in considerazione il clima reale della località di Roma nella forma di un *Test Reference Year*.

Si è proceduto separatamente alla simulazione dell'impianto nelle due modalità di funzionamento "riscaldamento" (periodo 01/11 – 15/04) e "raffrescamento" (periodo 01/05 – 30/09), per poi successivamente analizzare le prestazioni annuali. In una prima fase di "validazione" del modello costruito si è cercato di confrontare i risultati delle simulazioni con il reale comportamento operativo dell'impianto che si è verificato dal 09/02/2012 (data di inizio funzionamento) al 15/04/2012 (data fine stagione riscaldamento e per la quale si hanno a disposizione i dati misurati di funzionamento dell'impianto).

Una volta validato il modello, si è proceduto alla simulazione del comportamento dell'impianto nel funzionamento invernale al variare della dimensione fisica del serbatoio caldo e quindi al variare della capacità di accumulo (sensibile) dello stesso.

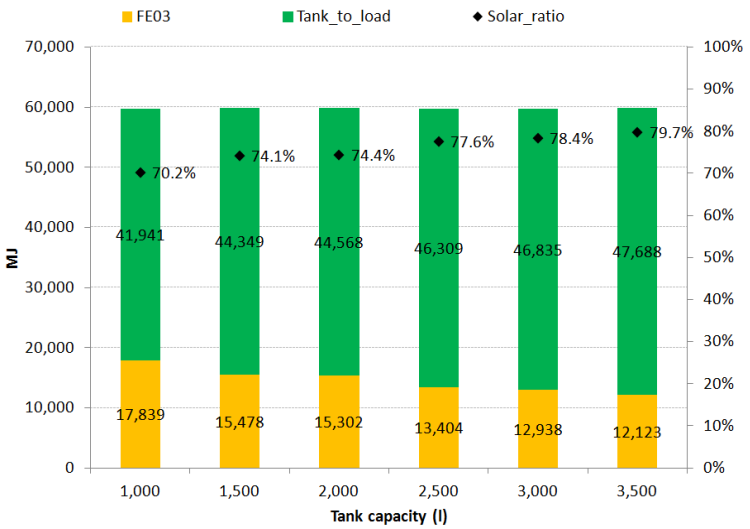


Figura 358. Simulazioni invernali: bilancio energetico dato dall'energia fornita dal serbatoio caldo (tank_to_load, energia prodotta dal campo solare all'utenza termica) ed energia termica di integrazione prodotta dal generatore di calore (fe03). la somma delle due quantità fornisce il fabbisogno di riscaldamento (fe07). i dati (in mJ) sono espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo (in litri) e valgono per il periodo convenzionale di riscaldamento (01/11 – 15/04)

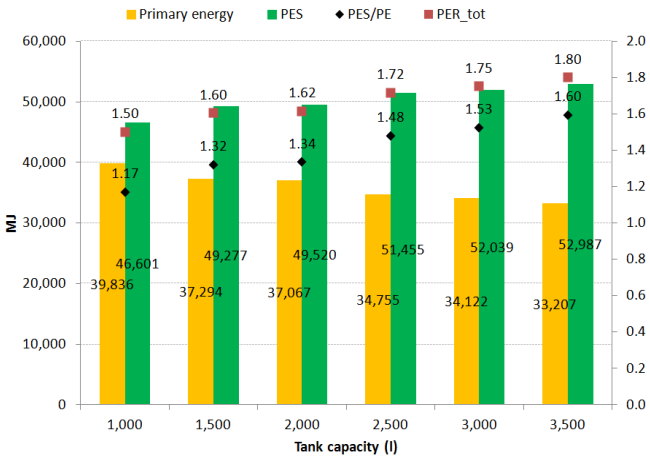


Figura 359. Simulazioni invernali: consumo totale di energia primaria (pe, primary energy, relativo a caldaia+pompe+ventilatore del dry-cooler), risparmio di energia primaria (pes, primary energy saving, inteso come energia primaria che si sarebbe consumata per produrre la stessa quantità di energia solare utile all'utenza prodotta dall'impianto), rapporto tra le due grandezze (pes/pe) e rapporto di energia primaria totale (per_tot, primary energy ratio, inteso come rapporto tra fabbisogno termico dell'utenza e totale consumo di energia primaria). i dati (in mJ sono espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo (in litri) e valgono per il periodo convenzionale di riscaldamento (01/11 – 15/04)

L'analisi delle figure evidenzia un sostanziale aumento delle prestazioni dell'impianto all'aumentare della capacità di accumulo del serbatoio solare: l'apporto di energia termica dalla caldaia diminuisce spostandosi verso dimensioni dell'accumulo maggiori, in quanto aumenta l'apporto di energia solare. Questo è testimoniato anche dall'aumento del grado di copertura solare e soprattutto dall'aumento dell'indice *PER_tot* (dato dalla diminuzione del consumo di energia primaria). Quest'ultimo diminuisce in virtù sia del minor apporto della caldaia sia della minor necessità di dissipazione dell'energia solare al *dry-cooler* (con relativo minor consumo elettrico).

In conclusione, l'analisi del comportamento invernale dell'impianto privilegia la scelta di una taglia dell'accumulo solare pari a 3500 L.

Nel funzionamento estivo dell'impianto vi sono, come anticipato sopra, due possibilità di confronto sulle quali discutere la successiva scelta della capacità di accumulo ottima. Si sono quindi svolte due serie di simulazioni, una al variare della capacità di accumulo del serbatoio caldo (solare) tra 1000 e 3500 litri (funzionante ad 88 °C per alimentare la macchina ad assorbimento, Figura 361 e 362) e l'altra al variare della capacità di accumulo del serbatoio freddo (utenze) tra 500 e 3000 litri (funzionante a 7 °C per servire i fabbisogni frigoriferi dell'edificio, Figura 363 e 364).

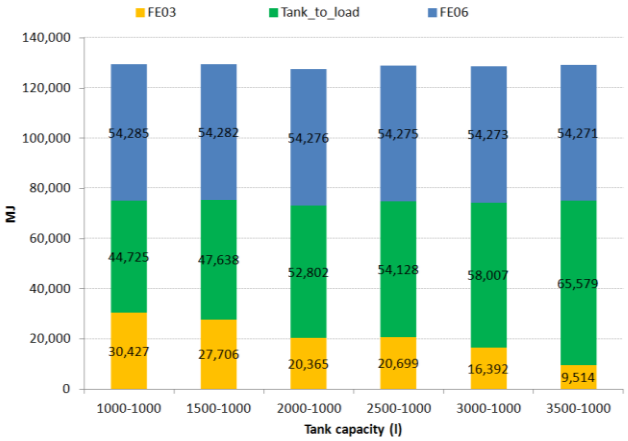


Figura 360. Simulazioni estive: bilancio energetico dato dall'energia fornita dal serbatoio caldo (tank_to_load, energia prodotta dal campo solare alla macchina frigorifera ad assorbimento), energia termica di integrazione (sempre indirizzata al generatore del chiller ad assorbimento) prodotta dal generatore di calore (fe03) ed energia frigorifera prodotta dalla macchina ad assorbimento (fe06). la somma delle tre quantità fornisce di fatto l'energia smaltita dal condensatore/assorbitore alla torre evaporativa. i dati (in mj) sono espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo solare (in litri), mantenendo costante la dimensione del serbatoio freddo al valore reale (1000 L) e valgono per il periodo convenzionale di raffrescamento (01/05 – 30/09)

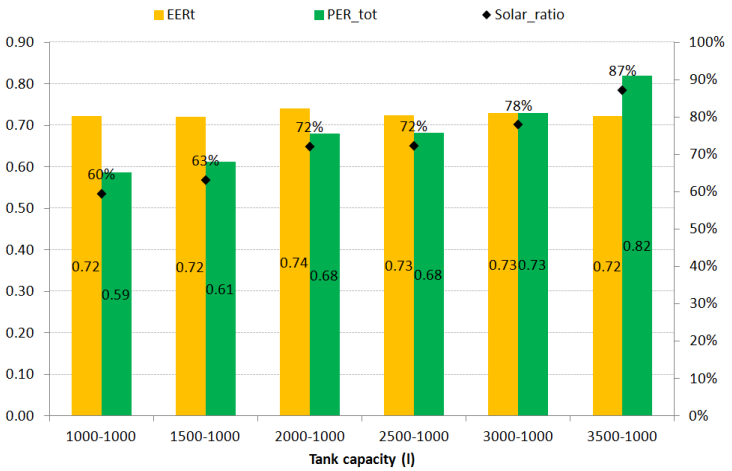


Figura 361. Simulazioni estive: principali indici di efficienza energetica dell'impianto. eert=energy efficiency ratio termico, rapporto tra energia frigorifera prodotta ed energia termica impiegata dalla macchina ad assorbimento; per_tot=primary energy ratio, rapporto di energia primaria totale inteso come rapporto tra fabbisogno frigorifero dell'utenza (fe07) e totale consumo di energia primaria; solar_ratio=copertura solare. i dati sono espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo solare (in litri), mantenendo costante la dimensione del serbatoio freddo al valore reale (1000 L) e valgono per il periodo convenzionale di raffrescamento (01/05 – 30/09)

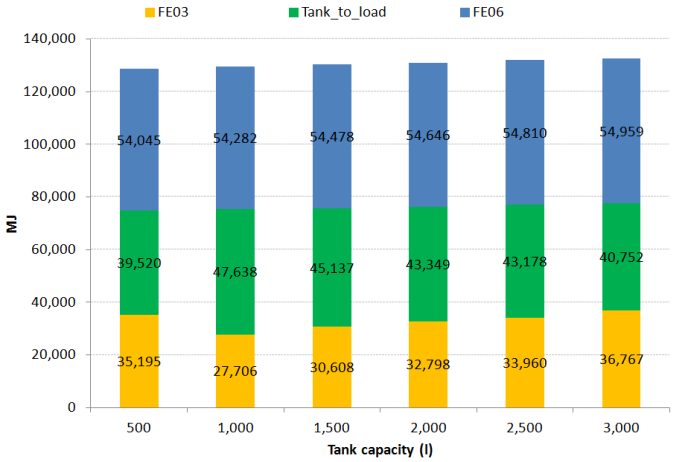


Figura 362. Come la Figura 361 con i dati espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo freddo (in litri), mantenendo costante la dimensione del serbatoio solare al valore reale (1500 L)

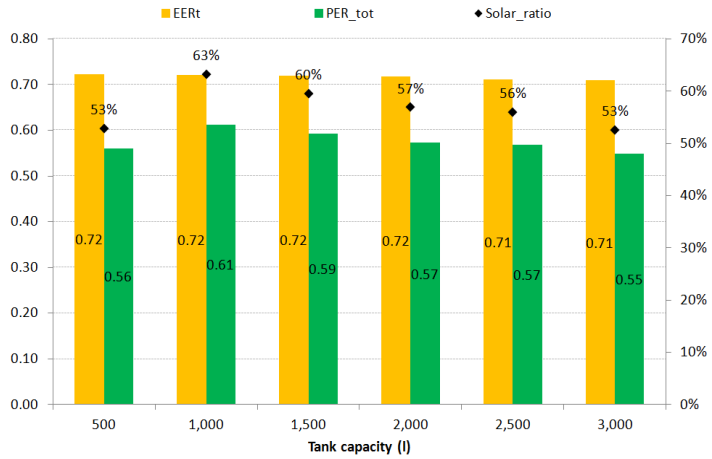


Figura 363. Come la Figura 362 con i dati espressi al variare della capacità del serbatoio di accumulo freddo (in litri), mantenendo costante la dimensione del serbatoio solare al valore reale (1500 L)

In estrema sintesi, il confronto fra le figure evidenzia che il consumo di energia primaria totale (caldaia+pompe+ventilatore del *dry-cooler*+ventilatore della torre evaporativa) è sempre minore nei casi relativi al variare della dimensione dell'accumulo solare ad 88 °C rispetto a quelli relativi al variare della dimensione dell'accumulo freddo a 7 °C. Inoltre, gli indici di efficienza *PES* e *PER_tot* migliorano (crescono) all'aumentare della taglia dell'accumulo solare, mentre presentano un valore massimo al variare della taglia dell'accumulo freddo (in corrispondenza del valore reale di 1000 L). I risultati delle simulazioni estive evidenziano, in conclusione, che la soluzione energeticamente migliore (miglior *PES* e *PER_tot*) si ha con un accumulo solare di 3500 l ed un accumulo freddo delle dimensioni pari a quello esistente (1000 L).

Si sono poi valutati i risultati in termini di fabbisogno di energia primaria complessivo annuo per la climatizzazione estiva ed invernale, sommando i valori relativi a tutti casi presi in esame: serbatoio solare variabile tra 1000 e 3500 litri (funzionante a 45 °C nel periodo 01/11 - 15/04 ed 88 °C nel periodo 01/05 - 30/09) e serbatoio freddo funzionante a 7 °C ovviamente nel solo periodo 01/05 – 30/09 (Figura 364). La soluzione energeticamente maggiormente conveniente risulta essere, dalle considerazioni sopra esposte, quella relativa ad un accumulo solare di 3500 l ed un accumulo freddo di 1000 L.

Figura 364. Simulazioni annuali: consumo totale di energia primaria al variare della capacità del serbatoio di accumulo solare mantenendo costante la dimensione del serbatoio freddo (istogrammi ocra, asse orizzontale inferiore) e consumo totale di energia primaria al variare della capacità del serbatoio di accumulo freddo mantenendo costante la dimensione del serbatoio solare (istogrammi verdi, asse orizzontale superiore)

I risultati dell'analisi energetica vanno interpretati anche alla luce di una seppur molto semplice valutazione economica, per verificare l'opportunità della scelta finale di dimensionamento degli accumuli dell'impianto. Nella relazione vengono riportate tutte le ipotesi del confronto effettuato tra impianto attuale (*solar heating* e *cooling*) ed impianto "tradizionale" (caldaia a gas al posto dell'impianto solare). Per brevità vengono qui riportati i risultati finali solamente per uno dei casi, al variare della capacità del serbatoio di accumulo solare (mantenendo costante la dimensione del serbatoio freddo al valore reale, 1000 L) e considerando una differenza tra i costi d'investimento nei due impianti a confronto pari al 30% del costo dell'impianto di *solar heating* e *cooling* (Figura 365).

I risultati dell'analisi confermano la bontà della scelta emersa anche dall'analisi energetica: un accumulo solare di 3500 l ed uno freddo di 1000 l consentono i migliori risultati sia in termini di valore attuale netto differenziale che di tempo di ritorno differenziale. La capacità di accumulo di energia termica con un serbatoio di 3500 l è di circa 73 MJ (ipotizzando un ΔT tra acqua in ingresso ed in uscita pari a 5 °C).

Una volta individuata la capacità ottimale si è passati alla valutazione del materiale PCM. Ci si è concentrati sui prodotti forniti dall'azienda Phase Change Material Product Limited, in particolare sui sali idrati della serie S89-S7. Su suggerimento del costruttore, ci si è rivolti a questo tipo di materiali anche per la possibilità di incapsulamento in pratici tubi in HDPE del diametro di 5 cm, lunghi 1 m. Il procedimento di calcolo per la scelta del tipo di materiale da utilizzare e del relativo dimensionamento del serbatoio di accumulo solare viene omesso in questa sintesi per brevità (è descritto nella relazione completa). Esso tiene conto delle principali caratteristiche termofisiche dei materiali, dei relativi costi e di altre variabili indipendenti.

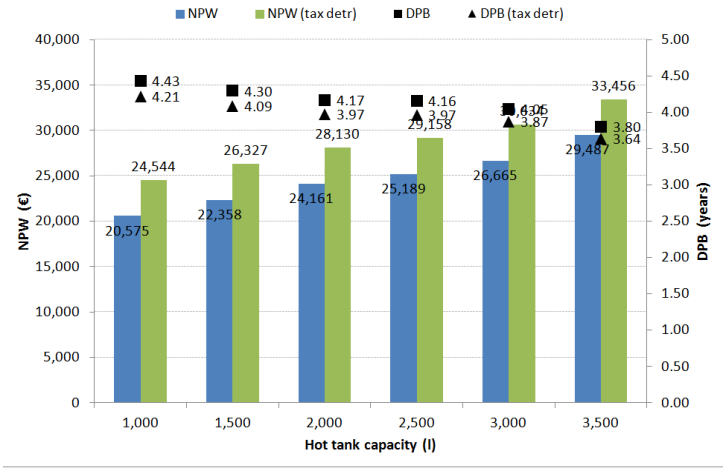


Figura 365. Valore attuale netto e tempo di ritorno scontato dell'investimento dell'impianto di solar heating e cooling rispetto ad un impianto tradizionale al variare della capacità del serbatoio di accumulo solare, mantenendo costante la dimensione del serbatoio freddo al valore reale (1000 L). I risultati sono riportati anche nel caso di detrazione fiscale del 55% in dieci anni (caso differenza del costo d'investimento pari al 30% del costo dell'impianto di solar heating and cooling)

I risultati derivanti dal calcolo devono poi tener conto del vincolo esterno sul budget a disposizione e delle necessità costruttive di disposizione dei tubi all'interno della sezione del serbatoio. L'ordine del serbatoio risulta quindi così costituito (maggiori dettagli nella relazione completa):

- accumulo da 1000 L;
- materiale PCM e n. tubi: S46 - 130 tubi;
- costo complessivo della fornitura: 8000 €;

che consente una capacità dell'accumulo nel funzionamento invernale pari a 69 MJ (in grado di coprire il carico di progetto dell'edificio per 1 h) ed una capacità nel funzionamento estivo di 105 MJ (in grado di alimentare a potenza nominale la macchina frigorifera ad assorbimento per 1,2 h).

A.5 Studio e progettazione di un sistema di smaltimento statico del calore

Il sistema di dissipazione del calore per impianti solari [Report RdS/2012/126] è costituito da uno scambiatore di calore alettato da utilizzarsi per il trasferimento all'aria esterna del calore in eccesso prodotto da un collettore solare a tubi evacuati, da una valvola termostatica a due vie appositamente progettata e da tubazioni di collegamento (Figura 366).

Uno dei componenti principali del sistema di smaltimento del calore è la valvola termostatica. La valvola è stata progettata per una temperatura di apertura di 92 °C con precisione del +/-5%. Le connessioni A e B sono sempre aperte indifferentemente dalla temperatura di lavoro (il fluido può scorrere nel verso bidirezionale, cioè non c'è un verso da rispettare), la connessione C si apre solo dopo che la temperatura ha superato i 90-95 °C; la temperatura viene rilevata nel punto indicato sul disegno. Anche per la connessione C non vi è un verso obbligato di scorrimento del fluido. La valvola è progettata per un collocamento all'esterno.

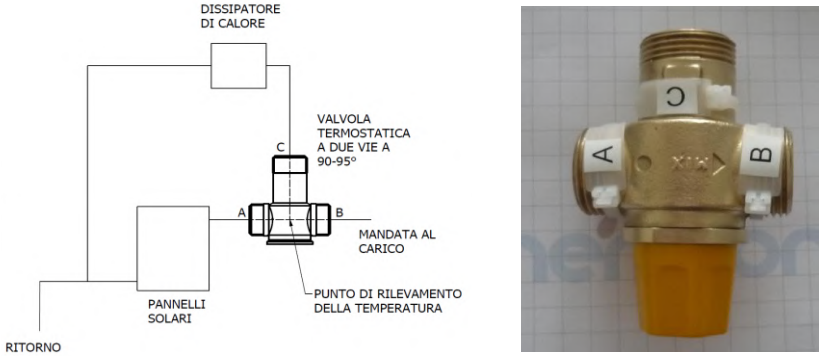


Figura 366. Schema di montaggio del prototipo di valvola termostatica e prototipo della valvola termostatica

L'altro componente fondamentale del sistema di dissipazione del calore è lo scambiatore di calore tra l'acqua contenuta nel circuito dei collettori e l'aria esterna. Lo scambiatore è stato progettato in modo da poter smaltire una potenza termica di circa 2 kW in condizioni di circolazione naturale sia sul lato acqua che su lato aria. Per raggiungere questo obiettivo, è stato necessario condurre un'analisi dettagliata dei diversi fenomeni coinvolti di cui si parlerà nel seguito. Il valore di 2 kW scelto per il progetto dello scambiatore è relativo alla potenza sviluppata da un collettore a tubi evacuati avente le caratteristiche riportate in Tabella 72 per una temperatura di ingresso di circa 92 °C e un irraggiamento di 1000 W/m^2.

Tabella 72. Dati tecnici relativi al collettore solare Kloben SKY21 CPC 58

Altezza, [mm]	1603
Larghezza, [mm]	2348
Spessore, [mm]	140
Superficie di apertura netta, [m^2]	3,31
Numero di tubi	21
η_0	71,.8
a_1, [WK^{-1}m^{-2}]	0,974
a_2, [WK^{-1}m^{-2}]	0,005

Lo scambiatore di calore scelto è una batteria alettata con tubi in rame e alette in alluminio le cui caratteristiche costruttive sono riportate in Tabella 73. Per il dimensionamento si rimanda al paragrafo successivo.

Tabella 73. Dati tecnici relativi alla batteria alettata

Standard H — DATI TERMODINAMICI — I/1/4/195/0101

LATO ALETTE		Richies.	Calcol.	LATO TUBI		Richies.	Calcol.
Fluido: aria				Fluido: ACQUA			
Quantità	m3/h	110	110	Quantità	l/h		86
Aria secca	kg/h		135	Temperatura ingresso	°C	86	86,0
Peso specifico	kg/m3		1,2250	Temperatura uscita	°C	64.6	64,6
Temp. ingresso	°C	27.8	27,8	Peso specifico	kg/dm3		0,975
Temperatura uscita	°C	83.3	83,3	Calore specif.	kcal/kg°C		1,001
Velocità front.	m/sec		0,1	Conducib.term.	kcal/hm°C		0,574
Perdita carico	mm H2O		0,0	Viscosità	centipoises		0,371
Capacità	kcal/h		1795	Velocità	m/s		0,12
				Perdita di carico	mH2O	1.5	0,12

DATI BATTERIA

Lunghezza alettato	mm	1070	1070	Diametro tubi	mm	16,50
Altezza alettato	mm	400	400	Spessore tubi	mm	0,40
Numero ranghi			3,41	Spessore alette	mm	0,13
Peso a secco, circa	kg		27	Superficie	m2	27,2
Contenuto di fluido	dm3		9,4	OUT OF CERTIF. RANGE		

Il funzionamento del sistema di dissipazione del calore

Il sistema è di tipo passivo è progettato in modo da poter funzionare anche in assenza di energia elettrica o in caso di blocco della pompa di circolazione del circuito primario dell'impianto solare.

La geometria del sistema e delle tubazioni di collegamento sono state scelte in modo tale da instaurare la circolazione naturale del fluido tra il collettore e lo scambiatore di calore alettato (Figura 367) prima dell'intervento degli organi di sicurezza presenti nell'impianto. Il sistema è stato appositamente progettato per essere installato in accoppiamento con collettori a tubi evacuati ma è possibile installarlo anche su collettori di tipo piano. Anzi, in questo ultimo caso, la circolazione dell'acqua è favorita da una maggiore distanza tra gli attacchi idraulici di mandata e ritorno.

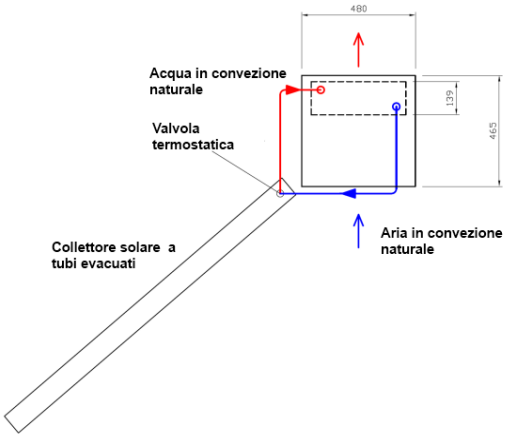


Figura 367. Schema di installazione del dissipatore di calore

Lo schema impiantistico di un impianto solare a convezione forzata prevede la presenza di un circolatore sul circuito primario di collegamento tra i collettori e il serbatoio di accumulo. Sullo stesso circuito sono poi installati il vaso di espansione, la valvola di sicurezza, gli sfiati e gli altri organi di controllo e sicurezza.

Nel funzionamento dell'impianto solare in accoppiamento al dissipatore solare si possono verificarsi due casi di seguito descritti.

Caso 1: Circolatore del circuito primario dei collettori solari in funzione

Questo è il caso tipico relativo a momenti di:

- basso carico (basso prelievo dall'accumulo solare);
- elevato irraggiamento solare;
- assenza di malfunzionamenti.

In questo caso, raggiunta la temperatura di circa 92 °C all'uscita dai collettori solari dove è posizionata la valvola termostatica, si apre il circuito del dissipatore che risulterà essere in parallelo a quello dei collettori. La portata di fluido che fluirà nel circuito del dissipatore sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la temperatura del fluido all'uscita dai collettori. All'aumentare di questa temperatura infatti la valvola a due vie si aprirà maggiormente (Figura 368). Le perdite di carico introdotte sulla porta B e C sono state tarate per mezzo di un apposito setto interno al fine di assicurare una circolazione di fluido sufficiente attraverso il dissipatore solare. In questo modo il calore potrà essere ceduto all'aria esterna evitando la formazione di vapore all'interno del collettore.

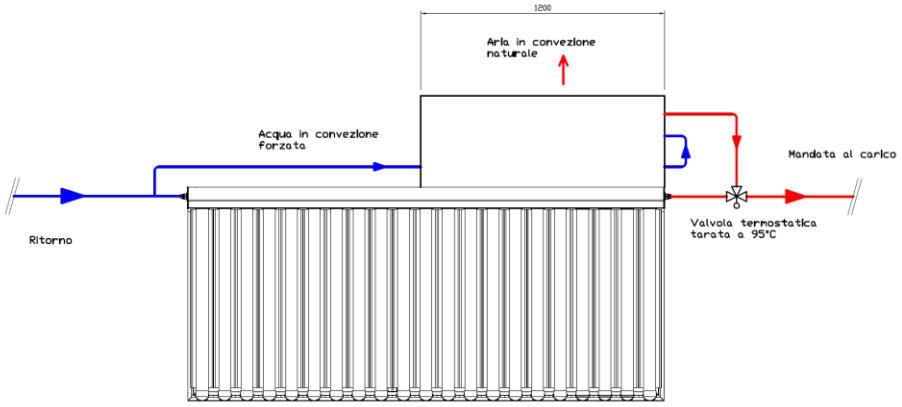


Figura 368. Funzionamento del sistema di dissipazione del calore nel caso di circolatore del circuito primario dei collettori solari in funzione

Caso 2: Circolatore del circuito primario dei collettori solari non in funzione

Questo è il caso tipico relativo a casi di interruzione dell'alimentazione elettrica del circolatore o avaria dello stesso a seguito dei quali non può esservi circolazione forzata di fluido nel circuito primario dei collettori. In questo caso, raggiunta la temperatura di 92 °C all'uscita dai collettori solari dove è posizionata la valvola termostatica, si apre il circuito del dissipatore. Grazie alla geometria del sistema si innescherà un circolazione naturale del fluido tra la stringa di collettori e il dissipatore di calore cosicché il calore prodotto dai collettori solari potrà essere ceduto all'aria esterna (Figura 369). I rami di mandata e ritorno del circuito primario non saranno percorsi da portata d'acqua.

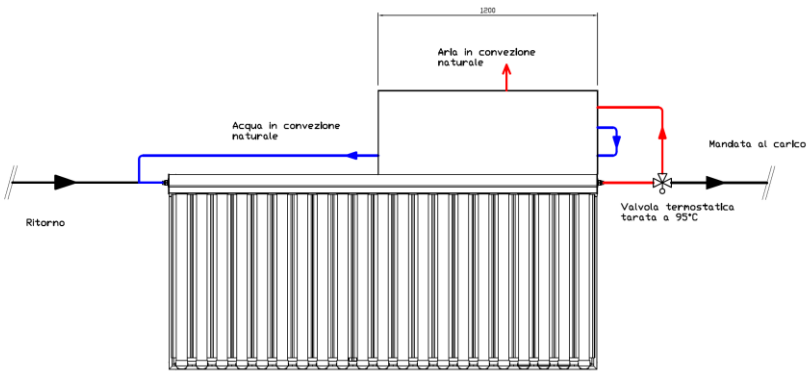


Figura 369. Funzionamento del sistema di dissipazione del calore nel caso di circolatore del circuito primario spento o in avaria

Metodo di calcolo

Per il dimensionamento dell'intero sistema di dissipazione del calore si è fatto uso della piattaforma di simulazione TRNSYS. E' stato creato un progetto su Simulation Studio comprendente tutti i componenti di impianto.

In particolare per la simulazione dello scambiatore di calore si è fatto uso del type 5b ove è necessario dare in ingresso il coefficiente di scambio termico globale UA espresso in W/K (A è l'area di scambio termico). Il modello di simulazione è di tipo monodimensionale ed è basato sul metodo ε NTU.

Dalle simulazioni svolte è stato possibile dimensionare la superficie di scambio della batteria alettata, ottimizzare il passo e l'altezza delle alette, e determinare il posizionamento della batteria rispetto al collettore solare. In relazione a quest'ultimo aspetto si è scelto di ridurre al minimo la distanza tra lo scambiatore e il collettore per limitare l'impatto visivo dell'intero sistema. Un incremento di questa distanza comporta in ogni caso un miglioramento della circolazione dell'acqua.

Per ciò che concerne la circolazione dell'aria in convezione naturale, si è deciso di inserire un plenum in ingresso allo scambiatore per agevolare la circolazione dell'aria. L'effetto termo gravimetrico aumenta infatti linearmente con la distanza tra il punto di ingresso e quello di uscita dell'aria. Le tubazioni di collegamento tra il collettore è lo scambiatore hanno una lunghezza complessiva di circa 2,5 m e sono state scelte con un diametro minimo DN 18. Si raccomanda di installare il collettore e le tubazioni in modo da evitare ogni possibile contropendenza e in modo anzi di agevolare il fluire dell'acqua nel ramo di mandata dal basso verso l'alto e dall'alto verso il basso in quello di ritorno così come riportato in Figura 369

A.6 Analisi sperimentale collettori solari termici ad heat pipe

L'impianto sperimentale utilizzato per il monitoraggio dell'heat-pipe, denominato T.O.S.C.A. (Thermalfluid-dynamics Of Solar Cooling Apparatus), è stato progettato e realizzato dal laboratorio di termofluidodinamica applicata ai sistemi energetici del centro ricerche ENEA di Casaccia. A valle dell'uscita dal collettore è presente una valvola di sicurezza seguita da uno scambiatore di calore. Dopo quest'ultimo si trovano in ordine: una pompa volumetrica, un misuratore di portata ad effetto Coriolis e un vaso di espansione. La pompa utilizzata è di tipo a vite eccentrica. Per la misura della portata massica è stato adottato un misuratore di portata ad effetto Coriolis. Subito dopo il misuratore di portata è stato installato un vaso di espansione di 2 litri. Tale componente è stato adottato per evitare che delle sovrappressioni o dei colpi d'ariete causino problemi di tipo strutturale al sistema.

Nel collettore, come già accennato, sono stati installati due trasduttori di pressione a monte e a valle dell'innesto con l'heat-pipe, chiamati rispettivamente p_1 e p_2. Le principali caratteristiche di questi misuratori sono: range di pressione da 100 mbar a 700 bar ed accuratezza ±0,08% del fondo scala. Le misure di temperatura sono state effettuate grazie a delle termocoppie di tipo K. In totale, sono state acquisite otto misure di temperatura di cui cinque sul circuito secondario. Tra queste ultime possiamo annoverare le T_1 e T_2 da 0,5 mm di diametro a monte e a valle dell'innesto con l'heat-pipe. T_3 e T_4 invece sono state installate ai capi dello scambiatore di calore e anch'esse presentano un diametro di 0,5 mm. Infine c'è un sensore di temperatura ambiente T_7 da 0,5 mm di diametro. Dopo il collettore è posta una valvola di sicurezza per evitare la formazione di sovrappressioni pericolose per l'integrità fisica dei trasduttori e di altri componenti sensibili. Lo scambiatore posto a valle della valvola di sicurezza è con la struttura esterna alettata per migliorare lo scambio termico, inoltre lo scambiatore è in controcorrente per minimizzare gli ingombri. Gli heat-pipe utilizzati sono di forma cilindrica, cavi all'interno. Il loro diametro interno è di 6 mm mentre il diametro esterno è di 8 mm. In totale, i tubi investigati sono stati 20. In particolare 8 di questi erano stati già utilizzati in una precedente campagna sperimentale per valutare l'effetto del grado di riempimento. Di essi ne è stato indagato uno per ogni differente grammatura per poter confrontare gli effetti dovuti all'inclinazione. Il grado di riempimento è un modo equivalente di esprimere la massa di un heat-pipe. Esso infatti si riferisce al volume occupato dal fluido interno a temperatura. Le prove sono state condotte utilizzando heat-pipe di differente massa: da 3 grammi a 20 grammi corrispondenti a riempimenti di 8,6% e del 57%.

Questi tubi sono stati realizzati con un grado di vuoto nominale di 10^{-2} mbar. La lunghezza misurata degli heat-pipe è di 1423 mm. La serie di heat-pipe usata per indagare l'influenza del grado di vuoto consiste in due differenti grammature di 5 g e 10 g e 3 gradi di vuoto differente, ovvero 10^{-3}, 10^{-2} e 1 mbar. In due diversi collettore su cui sono state effettuate l'analisi dell'effetto dell'inclinazione, del grado di vuoto e della temperatura in ingresso.

Figura 370. Collettori su cui sono stati effettuate le prove

Influenza dell'inclinazione dell'heat-pipe rispetto l'orizzontale

Una parte dell'analisi sperimentale condotta si è focalizzata sugli effetti indotti da una variazione di inclinazione dell'heat-pipe. Tutto ciò nell'ottica di massimizzare il trasferimento termico e minimizzare la resistenza termica totale offerta dal dispositivo. Dal momento che l'heat-pipe è del tipo termosifonico, cioè senza alcuna struttura porosa al suo interno, l'unica forza spingente tra condensatore ed evaporatore è la forza di gravità. Quindi si suppone, almeno in linea teorica, che le condizioni termofluidodinamiche del liquido evolvente cambino con l'inclinazione dal momento che il fluido non è più sottoposto alla stessa intensità di forza spingente. Obiettivo principale dell'attività tuttavia, è valutare se queste differenze emergono rispetto a tutti gli effetti collaterali introdotti, o vengano in qualche modo mascherate. L'inclinazione è stata variata dai 45° della precedente campagna sperimentale agli attuali 30°. Per evincere possibili variazioni di comportamento, non sono state variate le condizioni di prova rispetto alle precedenti campagne. Inoltre i test sono stati ripetuti sia per una potenza termica in ingresso di 70 W che per una potenza termica di 155 W. Si è innanzitutto provveduto a calcolare la costante di tempo, individuata con il metodo delle tangenti. Si è deciso di effettuare questa valutazione grafica sulla temperatura dell'evaporatore (T_5) poiché è quella che presenta l'andamento più regolare, non risentendo in maniera importante delle fluttuazioni tipiche che si instaurano a causa dei fenomeni di ebollizione interna. La Figura 371 mostra le costanti di tempo per ciascun riempimento per entrambe le inclinazioni di 45° e 30°. Possiamo notare dalla stessa figura come nel caso di inclinazione minore, ovvero 30°, il sistema sia più lento rispetto al caso di inclinazione pari a 45°. L'unica eccezione è rappresentata dal caso di riempimento pari al 57% in corrispondenza del quale si nota una inversione di tendenza che porta la τ di α =45° ad essere maggiore rispetto alla τ di α =30° di circa 180 secondi. Inoltre si nota come in funzione del riempimento si riscontri un certo trend di crescita della costante di tempo. Questo è giustificabile considerando che, dal momento che la massa di acqua aumenta, la costante di tempo aumenta.

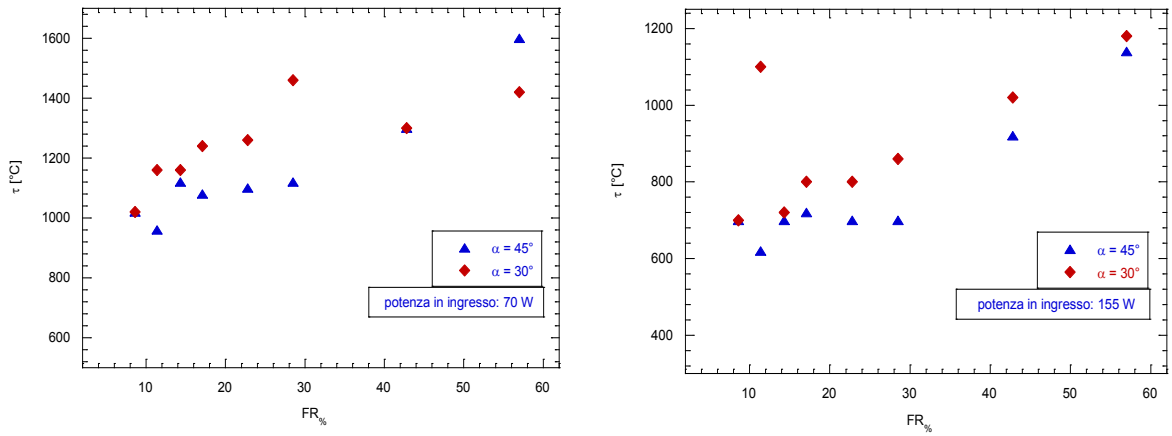


Figura 371. Effetto del riempimento e dell'inclinazione sulla costante di tempo

In applicazioni dove è importante la prontezza del dispositivo è sicuramente da preferire la configurazione di inclinazione pari a 45° unitamente ad un riempimento modesto. Questo potrebbe essere di interesse qualora il campo solare sia soggetto a fluttuazioni di intensità dovute alla variabilità delle condizioni metereologiche. I risultati ottenuti dalle prove effettuate in corrispondenza di una potenza in ingresso di 155 W confermano ciò che abbiamo già detto circa la convenienza di utilizzare una inclinazione di 45° e un grado di riempimento modesto

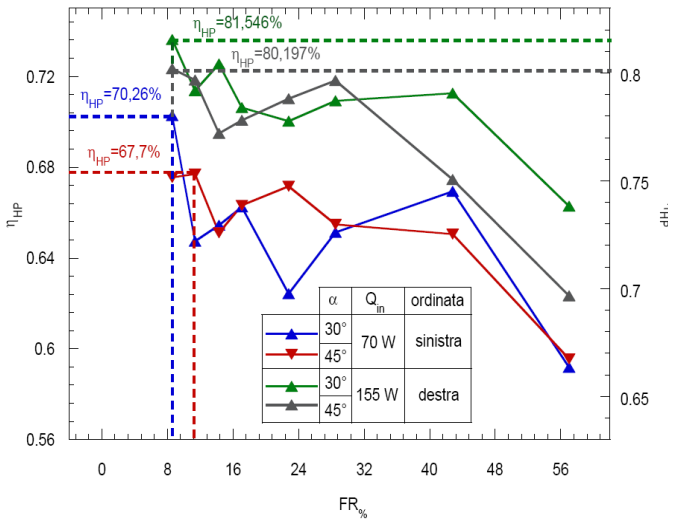


Figura 372. Andamento del rendimento in funzione del grado di riempimento

qualora l'obiettivo sia quello di disporre di un dispositivo di elevata prontezza. Inoltre, la presenza di specchi concentratori che aumenti la potenza in ingresso al tubo si rivela un fattore determinante qualora si voglia privilegiare un dispositivo che raggiunga subito le condizioni di regime. È stato inoltre monitorato l'andamento delle temperature T_5 e T_6 dell'heat-pipe al variare del grado di riempimento. Ricordiamo che queste termocoppie sono posizionate rispettivamente alla base del tubo di calore e in corrispondenza della sezione adiabatica. Notiamo che nel caso di T_5, i livelli di temperatura raggiunti si mantengono al di sotto di quelli relativi al caso di inclinazione pari a 45°. L'unica eccezione è rappresentata dalla grammatura di 6 g corrispondente ad un riempimento di 17,1%. Per la T_6 si nota ancora che l'inclinazione minore causa delle temperature di funzionamento minori. Un utile parametro per valutare la percentuale di calore trasferito rispetto al calore in ingresso è rappresentato dal rendimento dell'heat-pipe. Diagrammando tale grandezza per ciascun grado di riempimento otteniamo l'andamento riportato in Figura 372. Notiamo che in dipendenza dall'FR c'è una inclinazione che massimizza le prestazioni. Accade infatti che fino ad un riempimento del 17,1% conviene adottare una inclinazione di 30° con la sola eccezione rappresentata dal caso 11,4%. L'inclinazione di 30° è inoltre preferibile per riempimenti maggiori del 28,5%. Per valori intermedi di FR (22,8% e 28,5%) invece si rivela più proficuo adottare un'inclinazione di 45°. Invertendo il discorso precedente possiamo asserire che in dipendenza della particolare inclinazione con cui si vuole installare l'heat-pipe ci sarà un adeguato grado di riempimento del dispositivo che permetterà di massimizzare la percentuale di radiazione solare che verrà convertita in un incremento utile di entalpia dell'acqua nel collettore. Le conclusioni sul grado di riempimento ottimale da utilizzare nota l'inclinazione del collettore rimangono qualitativamente identiche anche per il caso di potenza in ingresso di 155 W. L'unico caso in cui si nota una discrepanza tra ciò che succede a 70 W e ciò che succede a 155 W si verifica in corrispondenza di un grado di riempimento pari al 57%.

Questo può essere giustificato osservando la Figura 372 in cui si nota la presenza di un fenomeno che accade esclusivamente in corrispondenza di questo valore di FR, dove per un livello di potenza di 70 W e per una inclinazione di 30° le temperature diventano molto differenti tra loro. Ciò accade poiché la massa di acqua è talmente importante che il liquido in questa configurazione si trova a lambire la parete interna della termocoppia con modalità differenti da quelle a film e molto più simili al pool. Tutto ciò comporta un crollo della temperatura T_6. Ad ogni modo si può concludere che per una inclinazione del collettore solare pari a 45° conviene utilizzare un riempimento dell'11,4% in corrispondenza di potenze in ingresso di 70 W e un riempimento dell'8,6% in corrispondenza di un input termico di 155 W. Invece i dati relativi all'inclinazione di 30° suggeriscono l'adozione dello stesso riempimento di 8,6% per entrambi i livelli di potenza termica. Nella Tabella 74 si riassumono i valori di rendimento massimo ottenibili dall'heat-pipe in funzione delle due differenti inclinazioni e potenze.

Tabella 74. Rendimento dell'heat-pipe per ciascuna inclinazione e potenza in ingresso

Potenza in ingresso [W]	Inclinazione [°]	Riempimento [%]	Rendimento [%]
70 W	45°	11,4	67,7
	30°	8,6	70,26
155 W	45°	8,6	80,2
	30°	8,6	81,55

Influenza del grado di vuoto

Per grado di vuoto si intende la depressione effettuata al momento della realizzazione dell'heat-pipe. Un fenomeno ben noto nella trasmissione del calore è il decadimento di prestazioni subito da una miscela bifase qualora l'area di scambio sia occupata da un incondensabile. Infatti in tali casi il coefficiente di scambio termico diminuisce localmente di diversi ordini di grandezza inficiando anche in modo pesante il meccanismo di scambio. Nel nostro caso ciò si verificherà nella sezione del condensatore poiché l'aria, essendo più leggera del vapore si porterà nell'estremità del tubo creando un vero e proprio effetto tappo. I test sono stati condotti per una portata di 7,4 kg/h, per una pressione del circuito secondario di 3 bar e per 70 W e 155 W di potenza termica in ingresso. Tali prove sono state ripetute per due distinte serie di tubi di calore che nel seguito indicheremo come serie I e II. Come fatto in precedenza è interessante valutare le costanti di tempo per ciascun tubo. Per questo motivo si è fatto ricorso alla stessa tecnica grafica adottata per il caso di differente inclinazione. In particolare le valutazioni sono state effettuate a partire dall'andamento della temperatura T_5 poiché più regolare della T_6. Dai valori di queste costanti si osservano dei comportamenti difficilmente spiegabili adducendo cause di tipo termofluidodinamico. Infatti ad un grado di vuoto più spinto dovrebbero corrispondere delle costanti di tempo più basse in linea teorica. Tutto ciò perché a gradi di vuoto maggiori corrispondono pressioni di saturazione minori con conseguenti minori temperature di saturazione. Ciò comporta che nel transitorio, a parità di temperatura raggiunta, si produca più vapore. Tutto questo causerebbe un raggiungimento più veloce delle condizioni di regime, tale andamento invece non si riscontra affatto nella campagna effettuata. L'ordine di grandezza delle τ viene tuttavia rispettato in funzione del riempimento. Infatti a riempimenti maggiori corrispondono costanti di tempo maggiori con l'eccezione del grado di vuoto 10-2 mbar della prima serie. Anche le temperature di regime misurate nei differenti casi presentano una notevole dispersione tra loro. L'unica eccezione è rappresentata dal caso di grado di vuoto interno pari ad 1 mbar. Visto che questo è il grado di vuoto meno spinto tra i tre, possiamo attribuire con un certo grado di certezza le discrepanze sperimentali al processo produttivo con cui sono realizzati gli heat-pipe. Nella fattispecie, la difficoltà si presenta nella produzione di due serie di tubi consecutive. Infatti, l'acqua che viene iniettata nei tubi di calore va ad inficiare il funzionamento delle pompe a vuoto utilizzate. Ciò causa notevoli incertezze circa il grado di vuoto raggiunto dai tubi nonché circa il loro effettivo riempimento soprattutto per i valori più piccoli. Un ulteriore parametro di rilevante importanza per valutare le prestazioni di un heat-pipe è sicuramente il calore che esso cede al circuito secondario. Nella Figura 373 è rappresentata tale grandezza in funzione della pressione interna. A conferma dell'incertezza derivante dal procedimento produttivo dei tubi di calore, dalla figura si nota un aumento della dispersione dei dati al crescere del grado di vuoto interno nel tubo. La situazione ottimale in ogni caso è rappresentata dal caso di pressione interna di 1 mbar sia in termini di valore della potenza trasferita, sia in termini di ripetibilità delle prove. Quest'ultimo punto è molto importante nell'esercizio dell'impianto per poter prevedere con facilità le prestazioni del tubo di calore.

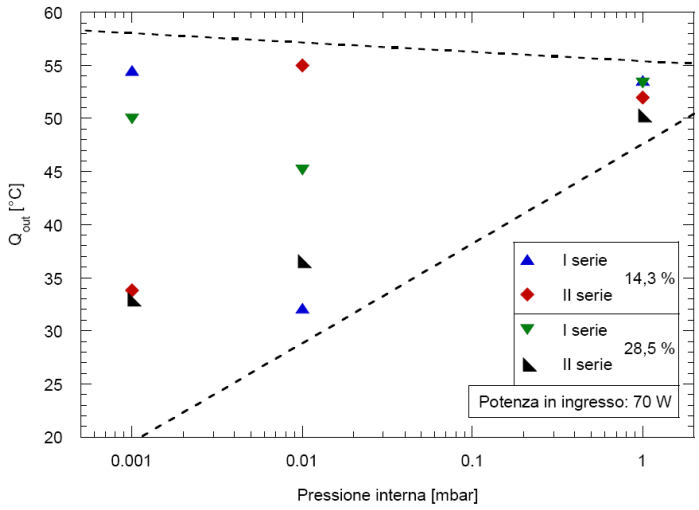


Figura 373. Calore dissipato dal tubo in funzione della pressione interna

Influenza della temperatura lato secondario

Un'altra serie di prove sperimentali ha riguardato l'analisi del comportamento del tubo al variare della temperatura dell'acqua che lambisce il condensatore. Questa misura viene effettuata nel tratto iniziale del collettore (T_1). Le prove sono state condotte mantenendo fissa la portata a 7,5 kg/h e la pressione a monte e a

valle del collettore a 3 bar. Inoltre esse sono state ripetute sia per il caso 70 W che per il caso 155 W. Il tubo è stato testato da 30 °C a 110 °C con incremento di 10 °C per un totale di 9 differenti prove. Le condizioni di regime sono state ritenute raggiunte con un sufficiente grado di sicurezza dopo circa 3600 secondi di acquisizione. Tutto ciò perché le costanti di tempo relative ad una variazione della temperatura T_1 di 10 °C sono molto basse rispetto a quelle che caratterizzano lo start-up dell'impianto. Queste ultime infatti, come abbiamo già visto sono dell'ordine di grandezza di 1000 secondi. L'analisi questa volta si è avvalsa anche di un ulteriore dato rappresentato dalla misura della temperatura del condensatore T_c. Essa è stata ricavata da una termocoppia posizionata in una cava realizzata sul tubo di calore. Per questo si è praticato un incavo sul tubo di rame con una profondità di 0,6 mm e con un diametro di 0,55 mm. A questo punto il giunto della termocoppia è stato inserito nella sede dopo essere stato piegato di 90°. Quindi il giunto è stato fissato nell'incavo attraverso una goccia di lega di stagno opportunamente modellata. Questo bulbo verrà immerso nel circuito secondario, quindi sarà lambito da un flusso di acqua. In Figura 374 è riportato l'andamento del calore ceduto al circuito secondario in funzione di T_1.

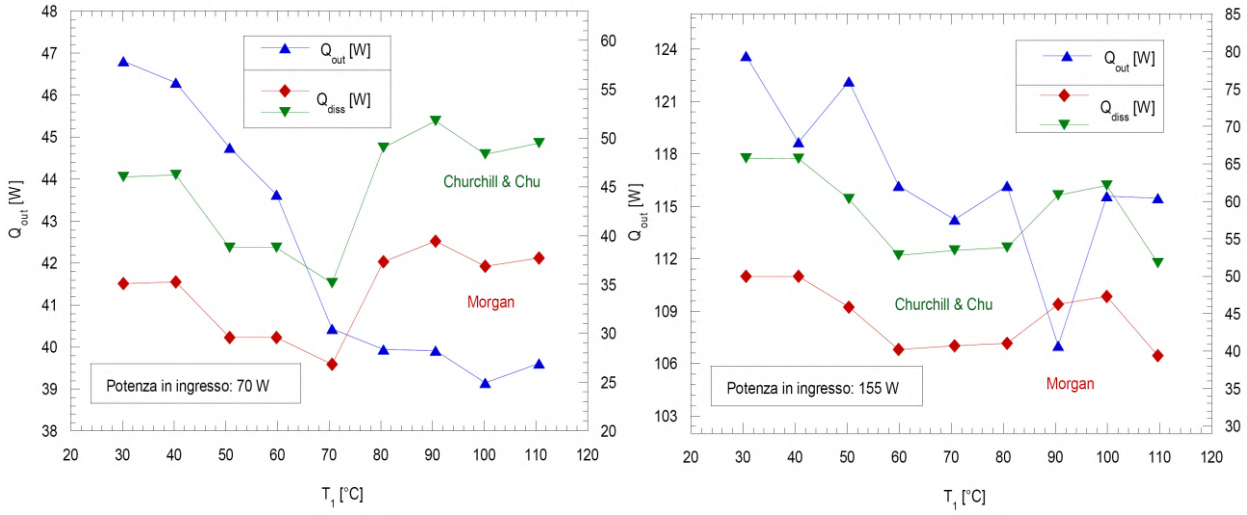


Figura 374. Potenza trasferita al circuito di prova al variare della T_1

Questa potenza termica, come già trattato nella sezione relativa all'apparato sperimentale è valutata come differenza tra la potenza in ingresso al tubo di calore meno la potenza dissipata da quest'ultimo. La valutazione della potenza dissipata è piuttosto difficoltosa. In realtà possiamo dire che essa è principalmente dovuta al contributo convettivo offerto dalla superficie esterna del tubo e dalla superficie esterna del collettore. Ci aspettiamo che la temperatura esterna aumenti all'aumentare delle temperature nel collettore. Ciò perché avvengono una serie di fenomeni consequenziali. Se infatti la T_1 diventa più elevata, di conseguenza la sezione del tubo che cede calore al fluido, deve portarsi ad una temperatura di esercizio maggiore per non violare il secondo principio della termodinamica. Ciò implica che tutto il tubo dovrà, in condizioni stazionarie, portarsi ad un livello termico più alto con un conseguente incremento della potenza dissipata verso l'ambiente circostante. Da tutto ciò discende che i tubi che vengono lambiti per ultimi in un collettore solare sono quelli che daranno meno contributo in termini di scambio termico poiché cederanno calore in corrispondenza di temperature medie maggiori. Come già accennato ci si aspetta che il calore disperso aumenti nel verso delle temperature crescenti compensando la diminuzione di potenza ceduta al circuito secondario. Il modello di approssimazione dell'intero sistema ad un tubo orizzontale va in crisi a basse T_1 poiché per tali temperature evidentemente crolla l'ipotesi di isotermia alla base di queste correlazioni. Infatti per tali regimi di funzionamento il collettore presenta temperature dell'ordine di grandezza di 30-40 °C invece l'heat-pipe arriva a temperature di esercizio già superiori ai 100 °C. Un utile indice della bontà dei meccanismi di trasferimento termico che stanno avvenendo nel condensatore e nell'evaporatore è il loro coefficiente di scambio termico che è graficato in Figura 375 in cui sono riportati i coefficienti di scambio termico all'evaporatore e al condensatore per la potenza di 70 Watt.

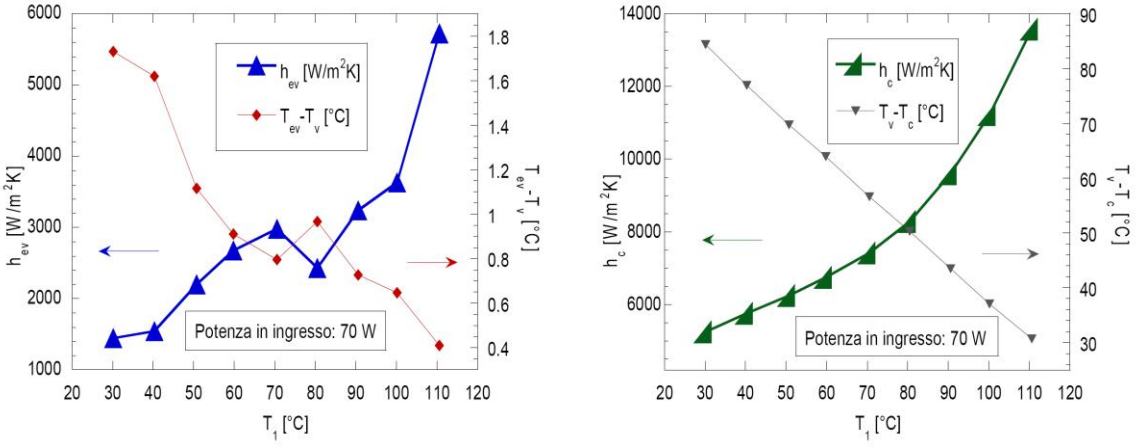


Figura 375. Coefficienti di scambio termico dell'evaporatore e del condensatore in funzione della temperatura T_1

In definitiva, per quanto riguarda la sezione dell'evaporatore, si può concludere che essa scambia meglio in corrispondenza di temperature del collettore più basse. Nel condensatore invece l'andamento risulta invertito e lo scambio termico si rivela migliore in corrispondenza della presenza di temperature più alte nel collettore. In definitiva quindi occorre una grandezza che ci dia la misura di quanto efficientemente stia scambiando l'heat-pipe considerato nella sua interezza: questa grandezza è la resistenza termica. L'andamento della resistenza in funzione della temperatura del collettore è presentato in Figura 376. La potenza termica che transita nel tubo di calore non si mantiene costante lungo tutta la lunghezza del tubo, ma diminuisce progressivamente a causa delle perdite verso l'ambiente circostante. In definitiva possiamo osservare che il tubo che opera in corrispondenza di una potenza in ingresso di 70 W oppone una resistenza al passaggio del flusso di calore maggiore rispetto al tubo che opera a 155 W. Inoltre la sensibilità alla variazione di T_1 è maggiore nel tubo alimentato a minore potenza.

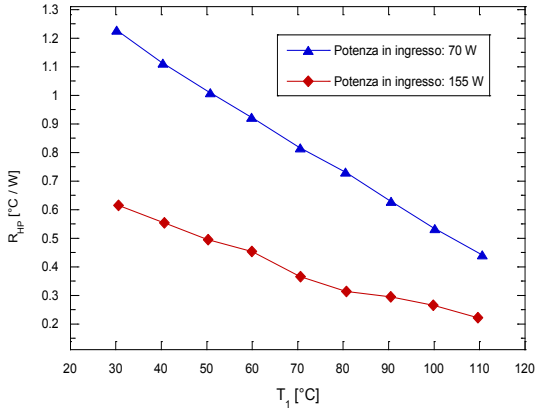


Figura 376. Resistenza totale del tubo di calore al variare della T_1

Uso di un nuovo tipo di collettore

È stato testato l'effetto di un collettore di diverso tipo sull'heat-pipe. Questo componente è stato presentato nella sezione dell'apparato sperimentale. Le prove sono state condotte variando la temperatura in ingresso al collettore da 50 °C a 110 °C grazie al preriscaldatore del circuito secondario. La prima grandezza che può essere analizzata è la costante di tempo. Ancora una volta le prove sono state condotte fissando la portata e la pressione rispettivamente a 7,5 kg/h e 3 bar. Possiamo spiegare l'aumento della costante di tempo in funzione della T_1: all'aumentare della temperatura di ingresso dell'acqua nel collettore, il tubo di calore si porta ad una temperatura maggiore poiché deve scambiare calore col circuito secondario. Tutto ciò, per ovvi motivi fa salire la temperatura superficiale del tubo, indicata con il simbolo T_7. L'effetto finale è un allungamento della costante di tempo dovuto ad un incremento del calore disperso verso l'esterno. Anche per una potenza di 155 W si nota un incremento in funzione della temperatura T_1. Inoltre si nota un decremento della costante di tempo passando dalla potenza di 70 W a quella di 155 W le cui motivazioni sono già state discusse in precedenza. Analizzando i dati si nota una diminuzione della potenza dissipata a cui comunque corrisponde un incremento della costante di tempo. Per comprendere gli effetti della presenza del nuovo collettore si può disquisire sull'andamento del rendimento. Il massimo rendimento si ottiene ancora una volta in corrispondenza delle temperature minori. Ciò poiché le

dispersioni verso l'esterno diminuiscono. Di conseguenza una maggiore percentuale del calore in ingresso verrà trasferita nel circuito secondario. È chiaro come si riveli vantaggiosa la presenza del nuovo collettore che permette il trasferimento di una maggiore quantità di calore. Ciò avviene poiché le temperature di funzionamento del tubo diminuiscono passando dal collettore precedente a quello attuale. Le temperature minori sono in effetti un indice della bontà del trasferimento termico tra il condensatore e l'acqua del circuito secondario. Infatti visto che la superficie di scambio termico è aumentata, per dissipare la stessa quantità di calore basta una differenza di temperatura inferiore. Tuttavia in corrispondenza di alte temperature del collettore notiamo che si verifica una inversione di tendenza per quanto riguarda l'andamento del rendimento Infatti il massimo rendimento si raggiunge utilizzando il vecchio collettore piuttosto che il nuovo, qualora la temperatura T_1 sia superiore a 110 °C. Alla luce di tutto ciò, in un pannello solare potrebbe risultare conveniente utilizzare il nuovo collettore per i primi tubi della schiera e il secondo per gli ultimi. Tuttavia tale dato dovrebbe essere meglio contestualizzato in termini di temperatura ambiente. Infatti il nuovo collettore mantiene un rendimento migliore del vecchio anche se l'aliquota di potenza dispersa verso l'ambiente è minore a causa di una diminuzione di temperatura di circa 6 °C. Un'altra grandezza importante da indagare è sicuramente la resistenza termica del dispositivo. Vediamo dalla Figura 377 come essa diminuisca all'aumentare della T_1.

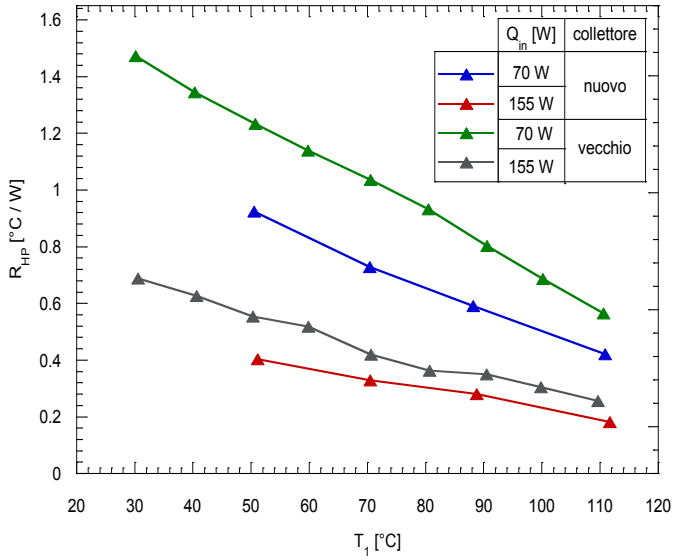


Figura 377. Andamento della resistenza termica in funzione della T_1

Ancora una volta la situazione privilegiata è rappresentata dalla presenza del nuovo collettore. Inoltre il caso di potenza in ingresso di 155 W si rivela più favorevole del 70 W sia nel vecchio che nel nuovo collettore. Per quanto riguarda invece i coefficienti di scambio termico all'evaporatore e al condensatore possiamo dire che la situazione preferenziale nella sezione dell'evaporatore è rappresentata dal "vecchio" collettore. Per quanto riguarda il condensatore invece è evidente che la situazione ottimale è quella che prevede la presenza della nuova tipologia di collettore. Inoltre visto che il coefficiente di scambio termico nel condensatore è circa il doppio che nell'evaporatore per entrambe le potenze in ingresso, si può ancora una volta asserire che da un punto di vista globale sia più importante mettersi nelle condizioni che massimizzano il coefficiente di scambio termico al condensatore. Se ne deduce che la configurazione più performante sia rappresentata dal "nuovo" collettore.

Conclusioni

Il lavoro svolto sull'heat-pipe ha permesso di stabilire l'influenza di una serie di parametri operativi sulle condizioni di funzionamento del dispositivo. Per quanto riguarda l'effetto dell'inclinazione, il massimo rendimento si ha in corrispondenza di una inclinazione pari a 30° e in corrispondenza di un riempimento di 8,6%. Di conseguenza, potendo fissare liberamente l'inclinazione, converrebbe optare per α=30°. Tuttavia, bisognerà tenere in conto anche la radiazione solare disponibile, diversa per ciascuna inclinazione e fortemente dipendente dalla latitudine e dal coefficiente di riflessione. A tale proposito converrà compendiare il tutto in un foglio di calcolo. Per quanto riguarda l'influenza del grado di vuoto, non si dispone di dati coerenti confermati dalle dispersioni sperimentali ottenute, quindi non si può concludere nulla circa l'influenza di quest'ultimo sulle prestazioni del collettore.

Dalle indagini effettuate variando la temperatura del circuito secondario, si è rilevato che un aumento di questa provoca la riduzione del calore trasferito da parte dell'heat-pipe. Ciò perché, aumentando la temperatura operativa, si verifica un incremento delle dispersioni verso l'esterno. Bisognerà tenere in conto di tutto ciò nella progettazione dell'intero collettore poiché verosimilmente i primi tubi scambieranno elevata potenza termica e gli ultimi tubi, lambiti da fluido molto più caldo, veicoleranno meno calore all'acqua del circuito secondario.

La campagna sperimentale si è concentrata anche sulla valutazione delle prestazioni offerte di un nuovo collettore. Si è verificato che tale dispositivo garantisce un trasferimento di potenza mediamente maggiore del collettore utilizzato in precedenza. Ciò vale per un ampio range di temperature compreso tra 50 e 110 °C. Tutto ciò è principalmente dovuto al fatto che il tubo è immerso nel collettore per un tratto maggiore, di conseguenza la superficie di scambio effettiva aumenta considerevolmente rispetto al collettore "a T". La presente attività di ricerca potrà essere proseguita valutando l'influenza di differenti condizioni operative. Nella fattispecie, una serie di prove di indubbia utilità, potrebbe riguardare l'analisi del comportamento del dispositivo al variare della temperatura ambiente. Ciò perché, in esercizio, esse varieranno anche in maniera piuttosto importante influenzando l'entità del calore che potrà essere trasferito. Oltre ciò sarebbe auspicabile un maggiore approfondimento dell'effetto derivante dal grado di vuoto presente all'interno del tubo di calore.

Per maggiori dettagli sull'attività A.6 si rimanda al rapporto RdS/2012/127.

A.7 Realizzazione di un prototipo di macchina frigorifera caldo/freddo dedicata al settore alimentare

I costi energetici legati ai trattamenti termici degli alimenti ad alta e bassa temperatura costituiscono una importante porzione dei costi energetici globali sostenuti dal sistema industriale: nel mondo essi sono stimati in circa due miliardi di dollari l'anno. Tali costi potrebbero essere considerevolmente ridotti realizzando i trattamenti con sistemi tecnologicamente avanzati e integrati. In particolare, si ritiene di poter contribuire a tali obiettivi attraverso la realizzazione di macchine reversibili in grado di produrre sia "caldo" che "freddo" a seconda delle necessità, con ridotto impatto economico.

In generale, i processi termici prevedono una prima fase di riscaldamento fino a temperature dell'ordine degli 80 °C ed una successiva fase di raffreddamento per la conservazione a temperatura controllata (generalmente dell'ordine di 4 °C) dell'alimento trattato.

In questa linea di attività è stata valutata l'opportunità di realizzare tali trattamenti avvalendosi di macchine reversibili a CO_2 (R744) per una serie di motivi, legati sia ad aspetti prestazionali, che di ridotto impatto ambientale del sistema complessivo.

La scelta della CO_2 come fluido di lavoro è legata a caratteristiche peculiari della stessa quali l'atossicità e la non infiammabilità e la compatibilità con i più comuni oli minerali; inoltre non aggredisce i metalli, né i materiali elastomerici. In più tale fluido è caratterizzato da un ridottissimo impatto ambientale, comprovato da valori del potenziale di riduzione dell'ozono (ODP) pari a 0 e del potenziale di riscaldamento globale (GWP) pari a 1.

Sotto il profilo delle prestazioni di scambio termico è stata spesso evidenziata l'elevata attitudine di un ciclo transcritico a CO_2 a fornire calore con rendimento elevato, attraverso il gas-cooler, a un fluido che debba subire un trattamento termico di riscaldamento, per l'ottimale corrispondenza dei profili di temperatura dei due fluidi avviati allo scambiatore.

D'altra parte, è noto che è possibile realizzare cicli frigoriferi utilizzanti CO_2, che possono garantire livelli di prestazione (EER- Energy Efficiency Ratio) diversi secondo le temperature della sorgente calda e fredda. Per i livelli di temperatura minima previsti per la maggior parte dei trattamenti termici (dell'ordine dei 5 °C) richiesti dai prodotti alimentari, si possono peraltro prevedere valori di EER soddisfacenti anche disponendo di sorgenti calde (aria o acqua) al gas cooler a temperature relativamente elevate.

Per questi motivi, si è ritenuto possibile proporre in questa attività di ricerca una macchina a CO_2 acqua-acqua di tipo reversibile in grado di realizzare trattamenti termici di raffreddamento e/o di riscaldamento [Report RdS/2012/128].. Si è proceduto a verificare i range di temperatura ottimali di utilizzo di una siffatta macchina e sono stati proposti vari schemi di impianto. Sono stati selezionati i principali componenti adatti a realizzare il ciclo termico completo per una situazione di riferimento caratterizzata da condizioni termodinamiche che includessero il maggior numero di trattamenti termici possibili. E' stato inoltre affrontato il problema dell'inversione del ciclo di funzionamento della macchina, che rappresenta il principale nodo tecnico da risolvere, dato che gli scambiatori, lavorando da evaporatori o da condensatori/gas-cooler a seconda delle necessità (produzione di caldo o freddo) devono presentare delle caratteristiche specifiche, peraltro completamente estrinsecabili dopo aver risolto le problematiche legate alla realizzazione degli idonei sistemi di gestione e controllo del compressore (bistadio con inverter) e della valvola elettronica selezionati per l'applicazione.

La pastorizzazione mediante un ciclo termodinamico a CO_2

L'obiettivo dei trattamenti termici in ambito alimentare è prevalentemente quello di aumentare il tempo di conservazione di alcuni alimenti grazie all'azione battericida del calore che riesce a disattivare gli enzimi e a distruggere gran parte dei microrganismi presenti nell'alimento. Tale processo di risanamento termico minimizza i rischi per la salute dovuti a eventuali microrganismi patogeni, con un'alterazione minima delle caratteristiche chimiche, fisiche e organolettiche dell'alimento trattato.

Tra i principali trattamenti termici di riscaldamento antimicrobici in campo alimentare, riveste particolare interesse la pastorizzazione (Figura 379), che può essere di tre tipi: bassa, che prevede il mantenimento di una temperatura di 63 °C per 10-15 minuti; alta, con temperatura di 72 °C per 15 secondi; alta di laboratorio con temperatura di 85 °C per 30 minuti. Il trattamento ad alta temperatura provvede all'abbattimento della flora batterica, ma non raggiunge temperature sufficienti a devitalizzare i microrganismi termofili, né tantomeno le spore. Questa fase è allora seguita da un trattamento a bassa temperatura (tipicamente 4 °C) che consente il bloccaggio dei processi di riproduzione microbica, garantendo una conservazione più duratura di alimenti altrimenti facilmente deteriorabili.

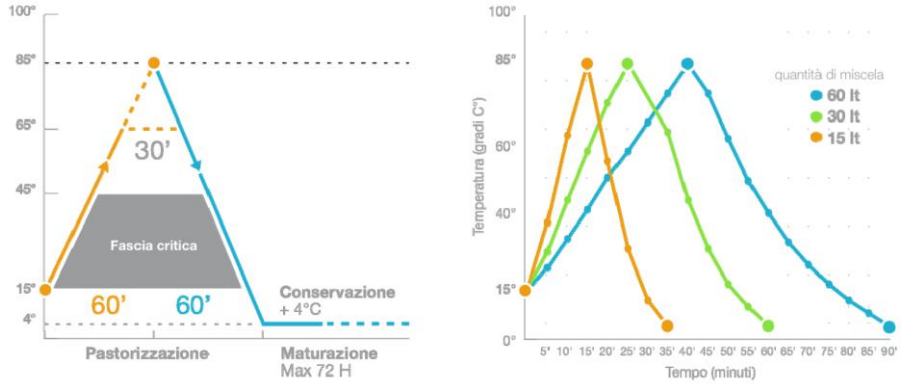


Figura 378. Esempio di ciclo di pastorizzazione

La pastorizzazione viene applicata, con diverse modalità, ad un cospicuo numero di alimenti (latte, birra, vino, succhi di frutta, uova, conserve, miscele per gelato, ecc.) con modalità diverse (Tabella 75).

Tabella 75. La pastorizzazione applicata a diversi prodotti alimentari

	Alimenti	Obiettivo principale del trattamento	Obiettivo secondario Del trattamento	Condizioni operative
pH<4,5	Succhi di frutta	Inattivazione degli enzimi	Distruzione dei microrganismi (lieviti, muffe)	65 °C per 30 min 77 °C per 1 min 88 °C per 15 sec
	Birra, Vino	Distruzione dei microrganismi e lieviti residui		65-68 °C per 20 min (in bottiglia) 71-75 °C per 1-4 min a 900-1000 kPa
pH >4,5	Latte	Distruzione dei patogeni	Distruzione dei microrganismi inquinanti ed enzimi	63 °C per 30 min 71.5 °C per 15 sec
	Uova	Distruzione dei patogeni	Distruzione dei microrganismi inquinanti	64,4 °C per 2,5 min 60 °C per 3,5 min
	Gelati	Distruzione dei patogeni	Distruzione dei microrganismi inquinanti	65 °C per 30 min 71 °C per 10 min 80 °C per 15 sec

Lo scopo dell' attività di ricerca è lo studio e il dimensionamento di un prototipo acqua-acqua ad inversione di ciclo istantaneo per la realizzazione di un processo termico completo (caldo-freddo) sui prodotti alimentari. Tale macchina dovrà essere in grado di garantire una temperatura del prodotto alimentare pari a circa T=65 °C per i primi 30 minuti di funzionamento per poi invertire immediatamente il ciclo (per produrre freddo) per portare la temperatura a 4 °C in ulteriori 30 minuti e poi consentire il mantenimento di tale temperatura per un tempo minimo di 40 ore. La potenza termica della macchina sarà pari a circa Pt=4,5 kW ed utilizzerà un compressore

bistadio ad alta efficienza e altri componenti innovativi in grado garantire un rendimento elevato sia in fase di riscaldamento che di raffreddamento

La maggior parte dei pastorizzatori attualmente utilizzati nei piccoli e medi esercizi commerciali effettuano la fase di raffreddamento post-pastorizzazione con un ciclo frigorifero standard a compressione di vapore (generalmente HFC), con condensatore ad acqua e compressore semi-ermetico, mentre la fase di riscaldamento (pastorizzazione propriamente detta) viene portata a compimento mediante l'ausilio di apposite resistenze elettriche dal rendimento unitario (ossia mettono a disposizione una quantità di energia termica pari a quella elettrica spesa). Anche per questo, i consumi energetici correlati al ciclo completo di pastorizzazione (riscaldamento/raffreddamento) rimangono tuttora abbastanza elevati a causa della forte incidenza del riscaldamento elettrico sul consumo energetico totale. E' quindi in quest'ottica che nasce l'idea di utilizzare un ciclo termodinamico ad alto rendimento anche per la fase di riscaldamento del prodotto alimentare. Le pompe di calore a CO_2 rappresentano in tal senso una più che plausibile risposta alla necessità di coniugare alte prestazioni con un consistente risparmio energetico, per i motivi di seguito elencati.

Innanzitutto, sfruttando le peculiari caratteristiche termodinamiche di tale fluido in pompe di calore a CO_2, è stato dimostrato che si può facilmente e con rendimenti molto elevati produrre acqua a temperature superiori ai 90 °C, difficilmente raggiungibili con i sistemi tradizionali (pompe di calore con fluidi alogenati in ciclo subcritico). Questo è possibile perché il ciclo transcritico a CO_2 si presta in maniera ottimale al riscaldamento di un fluido (Figura 379), con risparmi energetici fino al 75% rispetto ai riscaldatori elettrici. Il vantaggio di avere profili di temperatura bene accordati tra i due fluidi lungo lo scambiatore si traduce infatti in minori perdite di exergia nello scambio termico, che sono da ritenersi approssimativamente proporzionali, a parità di calore scambiato, alla differenza di temperatura tra i due fluidi. La minore perdita exergetica può costituire un fattore decisivo per assicurare alla CO_2 rendimenti migliori (COP di circa 3,5 - 4) rispetto a quelli realizzati da impianti operanti con fluidi tradizionali.

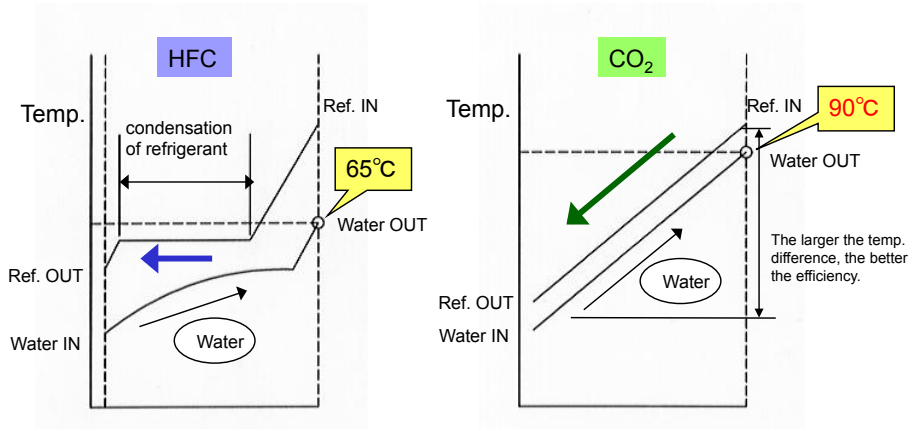


Figura 379. Differenza tra i profili di temperatura in un condensatore a HFC e in un gas cooler a CO_2 in una pompa di calore per il riscaldamento di acqua

Si può prevedere che i vantaggi appena visti nella produzione di acqua calda sanitaria possono riscontrarsi anche nel trattamento di altri tipi di prodotto alimentare: si tratta di "adattare" una pompa di calore a CO_2 ai carichi termici propri del processo completo di pastorizzazione del prodotto alimentare, massimizzandone il rendimento in ogni condizione operativa (ad es. al variare della quantità e del tipo di fluido da trattare) e definendone in maniera specifica la componentistica più efficiente e affidabile.

In termini pratici, lo studio di una macchina siffatta è stato condotto realizzando un impianto sperimentale per l'analisi dei singoli componenti e per la valutazione delle prestazioni complessive del prototipo di pompa di calore acqua-acqua ad inversione di ciclo "istantaneo".

Impianto sperimentale Pa.CO_2

L'impianto sperimentale Pa.CO_2 (Figura 380) è stato realizzato "accoppiando" due macchine attualmente in commercio e di comprovata efficienza: una pompa di calore a CO_2 della Sanyo per la produzione di acqua calda sanitaria e un pastorizzatore commerciale (in origine dotato di un circuito refrigerante a R404). Si è preferito, infatti, impostare la parte iniziale dell'attività sperimentale in maniera tale da ottenere dei risultati preliminari ma certi in termini di fattibilità (temperature e carichi termici desiderati) e di rendimento (risparmio energetico effettivo) del solo processo di riscaldamento. In tal senso va intesa anche la scelta di utilizzare l'acqua come fluido di lavoro al posto di un fluido generico.

Figura 380. Impianto sperimentale Pa.CO_2

Tra l'altro, la scelta di eseguire inizialmente test con acqua per verificare i tempi e l'energia richiesta per eseguire la fase di riscaldamento è stata fatta perché la maggior parte degli alimenti sottoposti al processo di pastorizzazione sono caratterizzati da un'elevata percentuale di acqua e quindi in qualche modo assimilabili a questa. L'accoppiamento tra pastorizzatore e pompa di calore è stato eseguito collegando la vasca del pastorizzatore allo scambiatore acqua/CO_2 della pompa di calore con due tubi flessibili opportunamente coibentati. Il fluido in uscita dallo scambiatore entra nella vasca del pastorizzatore che in questa fase funge solamente da elemento passivo di raccolta del fluido riscaldato dalla pompa di calore; l'acqua è poi inviata in entrata allo scambiatore sfruttando la prevalenza della pompa di circolazione del medesimo pastorizzatore.

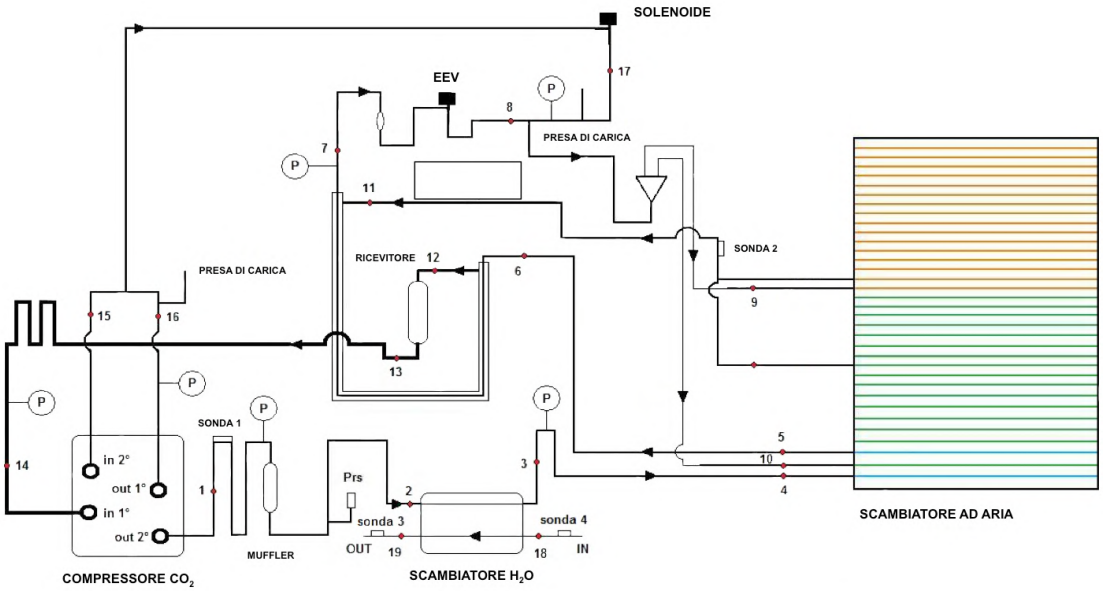


Figura 381. Schema d'impianto della pompa di calore Sanyo SHP-C45DEN

La pompa di calore Sanyo CO_2 ECO (SHP-C45DEN) da 4,5 kW rappresenta lo stato dell'arte per ciò che concerne le pompe di calore per la climatizzazione domestica. La Figura 381 ne mostra lo schema d'impianto e mostra i punti in cui sono stati collocati gli strumenti di misura (termocoppie di tipo J e K e misuratori di pressione) per rilevare lo stato termodinamico della CO_2 in ingresso ed in uscita dai vari componenti.

I componenti principali e più innovativi caratterizzanti la pompa di calore sono il compressore bistadio e lo scambiatore ad acqua. Il "cuore" della pompa di calore è senza dubbio l'innovativo compressore rotativo bistadio con inverter, realizzato da Sanyo con una tecnologia estremamente innovativa (Figura 382).

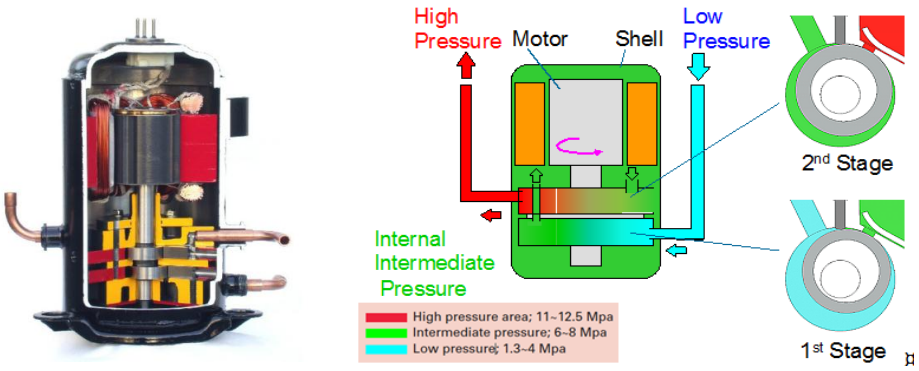


Figura 382. Compressore bistadio Sanyo per CO_2

Il compressore resiste a elevate differenze di pressione di lavoro, è estremamente affidabile grazie alla dispersione del carico, è soggetto solo minimamente a perdite ed è caratterizzato da bassi livelli di vibrazioni. Il funzionamento presenta ridotti livelli di rumore e grazie al suo design compatto e leggero consente una sostanziale riduzione degli ingombri e del peso della pompa di calore.

Il gas cooler (raffreddato ad acqua) è del tipo tubo in tubo ma presenta anch'esso delle soluzioni realizzative particolari sviluppate ad hoc da Sanyo. L'esclusivo disegno della sezione trasversale dello scambiatore (Figura 383), con tre tubi per il refrigerante disposti simmetricamente intorno al canale dell'acqua, oltre a consentire l'impiego di alte pressioni di lavoro per il refrigerante (sino a 14 MPa), fornisce incrementi in termini di efficienza dello scambio termico stimati nell'ordine del 60% rispetto alle soluzioni più tradizionali.

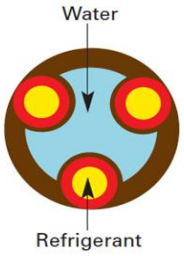


Figura 383. Sezione trasversale dello scambiatore ad acqua (gas cooler)

Un ulteriore importante organo costituente la pompa di calore è la valvola elettronica di espansione (EEV) che garantisce la laminazione necessaria all'esecuzione del ciclo termodinamico ottimale in funzione dei valori di temperatura acquisiti dai sensori a bordo macchina.

Prove e risultati sperimentali

La prove per la verifica delle prestazioni in riscaldamento sono state condotte, con portata controllata e monitorata, avviando l'acqua inizialmente posta nel serbatoio a 4 °C al gas cooler della pompa di calore. Durante la fase di riscaldamento è stato monitorato il dispendio energetico della macchina, fino alla conclusione della prova, giunta al raggiungimento di una temperatura dell'acqua in vasca pari a 65 °C.

La Tabella 76 riassume i risultati delle prove sperimentali in termini di tempo impiegato per effettuare il ciclo di pastorizzazione (fase di riscaldamento) e relativo consumo energetico. La notazione Pastomaster indica le prove effettuate utilizzando il programma di pastorizzazione di default del pastorizzatore impiegato che utilizza le resistenze elettriche per la fase di riscaldamento. La notazione Pompa di calore si riferisce invece alle prove in cui l'acqua viene riscaldata nel gas-cooler della pompa di calore a CO_2.

Nella tabella sono stati riportati i risultati di alcune tra le prove effettuate giacché non sono state riscontrate significative variazioni sui tempi e sui consumi del processo al mutare del valore di portata di acqua inizialmente impostato e della temperatura ambiente registrata.

Se si considerano le prove effettuate con la configurazione standard della pompa di calore (Tabella 76, prove E1 e Figura 384, che riporta gli andamenti delle temperature durante lo svolgimento del test E1.a), cioè con tutte le sonde inserite, si nota un risparmio energetico mediamente di oltre il 60% rispetto al riscaldamento effettuato con le resistenze elettriche, ciò però a fronte di un sostanziale raddoppio dei tempi di pastorizzazione.

Questi ultimi sono stati in seguiti considerevolmente abbassati, condizionando in maniera opportuna il segnale inviato dalla sonda 1 (mostrata in Figura 4) alla scheda elettronica di gestione, e bypassando completamente le sonde 3 e 4 che acquisiscono le temperature dell'acqua in ingresso e in uscita dal gas-cooler.

Tabella 76. Tabella riassuntiva tempi / consumi

PROVE ENEA					
E1. Prova comparativa pompa di calore Sanyo / Pastomaster 60Rtx					
	Quantità acqua	T acqua iniziale	T acqua fine	Tempo impiegato	Consumo energetico
Pompa di calore a)	60 L	4 °C	63 °C	1h 33' 45"	1,653 kWh
Pompa di calore b)	60 L	4 °C	65 °C	2h 16' 26"	2,.205 kWh
Pastomaster c)	60 L	4 °C	61 °C	44'	4,406 kWh
E2. Prova riscaldamento pompa di calore Sanyo con bypass sonde di temperatura ingresso - uscita acqua e condizionamento sonda uscita compressore					
	Quantità acqua	T acqua iniziale	T acqua fine	Tempo impiegato	Consumo energetico
Pompa di calore a)	60 L	4 °C	65 °C	59'21"	1,507 kWh
Pompa di calore b)	60 L	4 °C	65 °C	1h 00' 31"	1,569 kWh
Pompa di calore c)	60 L	4 °C	65 °C	58' 56"	1,616 kWh
E3. Prova riscaldamento pompa di calore Sanyo con bypass sonde di temperatura ingresso - uscita acqua e condizionamento sonda uscita compressore					
	Quantità acqua	T acqua iniziale	T acqua fine	Tempo impiegato	Consumo energetico
Pompa di calore a)	30 L	4 °C	65 °C	3'9 18"	0,908 kWh
Pompa di calore b)	30 L	4 °C	65 °C	37' 00"	0,870 kWh

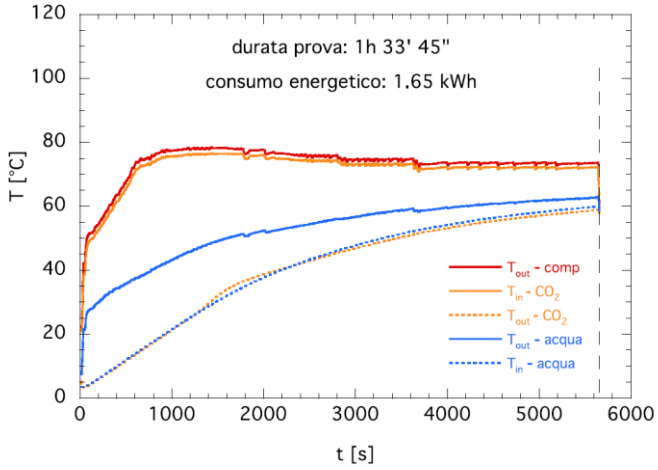


Figura 384. Prova di pastorizzazione con pompa di calore in configurazione standard

Un esempio di prova di pastorizzazione con condizionamento della sonda 1 è riportato in Figura 385 (prova E2.c). Si possono notare gli andamenti "altalenanti" delle varie temperature frutto delle regolazioni manuali sulla portata dell'acqua e delle inerzie termiche associate. La temperatura media in uscita compressore si attesta, dopo un transitorio iniziale, intorno al valore di 119 °C, ben al di sopra dei ca. 75 °C riscontrati nel funzionamento normale della pompa di calore, Nello specifico, facendo riferimento ai dati in ella 76, rispetto alla configurazione standard si registra per i consumi una riduzione compresa tra il 27% e il 32% mentre i tempi di processo si accorciano mediamente del 55 - 57%.

Di certo ancora più marcate risultano le differenze con le prove di riscaldamento a mezzo resistenze elettriche rispetto alle quali il funzionamento della pompa di calore in versione "modificata" fa registrare consumi più bassi di oltre il 65% a fronte di un non eccessivo allungamento dei tempi, stimato nell'ordine del 30 % (circa 15 min).

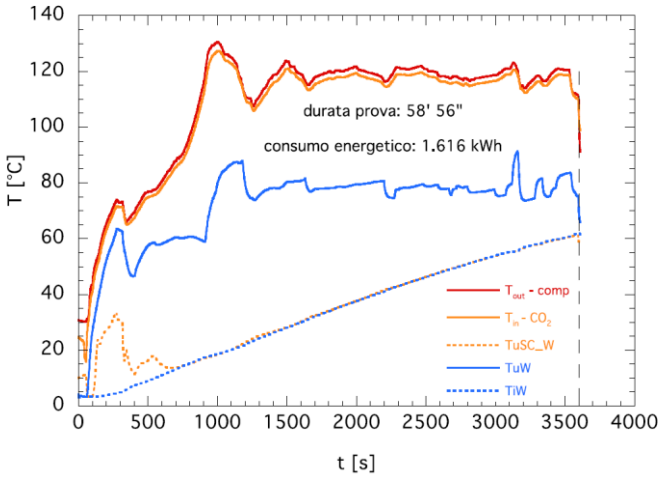


Figura 385. Prova di pastorizzazione con pompa di calore in configurazione modificata

Proposta di schemi impiantistici per l'inversione del ciclo

Per quanto riguarda il funzionamento in freddo, occorre dire che la disponibilità di una sorgente calda a temperatura piuttosto ridotta (acqua di rete a circa 15-20 °C) può consentire di ottenere un funzionamento in condizioni subcritiche con positive ripercussioni sul rendimento del ciclo: in questo caso, infatti, si riducono le pressioni di lavori e il Δp tra pressione massima e minima, per cui il compressore lavora con rendimenti isentropici maggiori e le perdite exergetiche connesse con il processo di laminazione sono fortemente contenute.

Riguardo la scelta dei componenti occorre dire che il compressore bistadio con inverter della Sanyo impiegato nella pompa di calore presenta caratteristiche prestazionali ottimali anche per un utilizzo nel prototipo in studio, così come la valvola elettronica montata sulla stessa pompa di calore garantisce, stando ai dati di catalogo, l'ottenimento di temperature e di carichi frigoriferi adeguati all'applicazione.

Nella pompa di calore Sanyo, la valvola elettronica è comandata da un motore passo-passo unipolare, a sua volta mosso da segnali provenienti dalla scheda di controllo in funzione dei parametri provenienti dai vari sensori di cui è dotata la macchina.

Un'importante parte dell'attività condotta in questa annualità ha riguardato proprio lo studio delle modalità di gestione, dal punto di vista elettronico, di questi due componenti, in quanto la logica di funzionamento adottata per la pompa di calore, tarata sui valori acquisiti dai numerosi sensori di cui è dotata la macchina, non è ovviamente adatta alla nostra applicazione. Si è proceduto realizzando due sistemi di controllo distinti per i due componenti e non dipendenti dai valori acquisiti dai sensori; in particolare per la valvola elettronica è stato realizzato un sistema di controllo, in via di sperimentazione, in grado di aprire o chiudere la valvola a piacimento a seconda della temperatura di evaporazione desiderata.

La scelta dello schema impiantistico e degli scambiatori sono strettamente correlate. Riguardo lo schema impiantistico occorre dire che sono possibili varie soluzioni. Tra le altre citiamo le seguenti:

- impianto con inversione di ciclo: prevede due soli scambiatori e due valvole di laminazione. Lo scambiatore in vasca (analogo a quello attualmente presente nel pastorizzatore utilizzato) funge da gas-cooler o evaporatore a seconda della fase (riscaldamento o raffreddamento) ed è alimentato, nei due casi, dal flusso proveniente dal compressore o dall'organo di laminazione. L'altro scambiatore lavora con acqua di rete e funge da evaporatore o da gas-cooler/condensatore rispettivamente. E' importante valutare in questo caso molto attentamente le condizioni di scambio e le caratteristiche della sorgente termica a disposizione che determinano il tipo di scambiatore da adottare. Si segnala, ad esempio, che uno scambiatore come quello di Figura 383, non sarebbe adatto all'inversione in quanto le cospicue perdite di carico che provoca lato CO_2 non ne consentirebbero un uso proficuo come evaporatore;
- impianto senza inversione di ciclo: in questo caso i due scambiatori principali, a piastre oppure tubo in tubo, conservano sempre la stessa funzionalità (gas cooler o evaporatore), e gli scambi termici con il prodotto alimentare e l'acqua di rete avvengono attraverso uno o due circuiti secondari riempiti con una miscela di acqua e glicole. In questo caso si ha il vantaggio di funzionamento migliore dell'impianto a CO_2, con i due scambiatori che possono essere dimensionati in maniera più efficiente (es. possibilità di utilizzo di geometrie ad alta efficienza). D'altra parte, l'aggiunta di due scambiatori ausiliari causa ovviamente delle

riduzioni di efficienza nello scambio termico globale.

I benefici dell'una o dell'altra configurazione potranno essere valutati a valle di una appropriata campagna sperimentale che possa infine permettere il confronto tra le varie configurazioni e la scelta della più performante.

Conclusioni

Lo studio preliminare e l'attività sperimentale finalizzata alla realizzazione di un prototipo di pompa di calore reversibile a CO_2 ha consentito di valutare il reale beneficio che una siffatta macchina può garantire nei trattamenti di riscaldamento dei prodotti alimentari rispetto alle situazioni convenzionali ed ha consentito di individuare i componenti più adatti anche per l'esecuzione della fase di raffreddamento e conservazione.

Riguardo il confronto con il processo di riscaldamento realizzato elettricamente dalle macchine in commercio, si può affermare che le prove di pastorizzazione mediante pompa di calore hanno evidenziato consumi sempre considerevolmente minori e tempi di realizzazione che possono facilmente essere allineati a quelli richiesti dal trattamento termico, ottimizzando la gestione elettronica del compressore e della valvola elettronica.

Si possono plausibilmente prevedere notevoli miglioramenti nelle prestazioni attese da una pompa di calore a CO_2 appositamente pensata per il trattamento di pastorizzazione e conservazione:

- intervenendo sul dimensionamento dei componenti;
- progettando una logica di controllo ottimizzata per le prestazioni richieste;
- determinando, a livello sperimentale, la migliore configurazione d'impianto possibile tra quelle individuate.

A.8 Realizzazione di un impianto di solar cooling a servizio di una serra per culture intensive

L'attività è stata incentrata sullo sviluppo di una facility per la caratterizzazione di sistemi solar cooling integrati in una serra sperimentale per la ricerca sulle piante transgeniche [Report RdS/2012/129]. Tale sistema è stato realizzato con un gruppo frigo ad assorbimento installato a servizio dell'edificio denominato "Serra Transgenica" esistente presso il C.R. Casaccia dell'ENEA (Figura 386).

Le piante geneticamente modificate (GM) sono organismi in cui sono trasferiti geni mediante tecnologie molecolari, secondo modalità differenti da quanto avviene con l'incrocio, sia in natura, sia nella pratica agronomica tradizionale. Oggi, nella ricerca, il trasferimento di geni esogeni nelle piante è uno strumento fondamentale per lo studio e la comprensione di aspetti fondamentali della fisiologia/patologia vegetale. Un settore più nuovo e di rilievo delle biotecnologie riguarda la produzione di piante esprimenti geni esogeni per utilizzare la pianta come "Biofabbrica" per la sintesi di biofarmaceutici o per migliorare caratteristiche di tipo "nutraceutico".

Figura 386. La serra transgenica del centro ENEA-Casaccia

A livello mondiale, l'attività di ricerca e sperimentazione nel settore delle biotecnologie agrarie è in continua crescita soprattutto nei paesi dove sono state sviluppate (Stati Uniti e Canada). In Europa l'attività di ricerca sull'ingegneria genetica vegetale è stata molto intensa fino al 1998. Negli anni successivi, a seguito della decisione di bloccare tutte le autorizzazioni per la commercializzazione di nuove piante geneticamente modificate, si è avuta una riduzione delle autorizzazioni per la ricerca e sperimentazione con piante GM.

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare descrive le 'Prescrizioni per la valutazione del rischio per l'agro-biodiversità, i sistemi agrari e la filiera agroalimentare, relativamente alle attività di rilascio deliberato nell'ambiente di OGM per qualsiasi fine diverso dall'immissione sul mercato. Ai fini di studio sperimentale, le piante GM devono rispondere a requisiti di 'contenimento' per non rappresentare elementi di rischio per l'ambiente.

La serra a contenimento del CR Casaccia è un impianto sperimentale per l'allevamento di piante GM e per lo svolgimento di attività di ricerca in condizioni ottimali e di biosicurezza di livello 2, realizzato per essere conforme alle normativa prevista in materia di sicurezza dall'Italia e dalla Unione Europea (Direttiva 2001/18/CE recepita con D.Lgs 224/2003). L'ENEA, infatti, detiene un insieme di competenze/conoscenze relative alla Biomedicina e Biotecnologie per la realizzazione di farmaci e sistemi d'avanguardia per terapia e diagnosi di patologie ad alto impatto sociale, basati anche sulle piante intese come "biofabbriche" e potenzialmente trasferibili.

La serra a contenimento occupa una superficie complessiva di 210 m^2 circa con un'altezza al colmo di 4,5 m. E' suddivisa al suo interno da un corridoio centrale su cui si affacciano otto moduli indipendenti di circa 14 m^2 ciascuno. Ogni modulo è dotato di impianti automatizzati indipendenti con relativi quadri di comando e regolazione per il riscaldamento, il raffreddamento, l'illuminazione e l'ombreggiamento in modo da realizzare livelli differenziati di microclima ed illuminazione.

La struttura della serra è realizzata in acciaio zincato a caldo con coperture e pareti divisorie realizzate in policarbonato alveolare da 16 mm. L'impianto serra è dotato di un sistema di aspirazione e filtraggio dell'aria, con portata da 10 m^3/h, in modo da realizzare una depressione all'interno di ciascun modulo. Il raffreddamento della serra è gestito tramite un impianto centralizzato, separato dall'impianto di riscaldamento, costituito da un gruppo frigo a quattro compressori da 160 kW. La serra è progettata e costruita perché non ci sia alcuno scambio con l'ambiente esterno, onde evitare qualsiasi diffusione di materiale GM. Le acque reflue vengono trattate mediante sterilizzazione UV su strato sottile e anche l'aria è opportunamente filtrata su pacchi filtro che impediscono la dispersione all'esterno dell'impianto di pollini e/o organismi.

La presente proposta del Progetto "solarizzazione" si basa essenzialmente su due elementi strategici fondamentali:

a. collegare su un piano funzionale a fonti energetiche una struttura di ricerca che presenta carichi energetici di una certa rilevanza;
b. promuovere la "convergenza delle conoscenze e delle tecnologie" sulla tematica, del risparmio energetico perseguendo l'obiettivo generale di conseguire risultati di grande impatto sul piano culturale e conoscitivo, ma che possano esprimere, nel breve periodo, un forte potenziale di innovazione in alcune applicazioni biotecnologiche di primaria importanza.

Progettazione impianto di solar cooling

La centrale frigorifera sperimentale realizzata per l'installazione in parallelo con l'esistente impianto di refrigerazione della serra transgenica, del tipo a compressione di vapore, sarà in grado di produrre circa 17 kW, pari a circa il 10% del carico frigorifero necessario al raffrescamento della serra transgenica.

Tale scelta è stata effettuata sulla base dello spazio a disposizione per il campo solare, che non ha permesso la realizzazione di un impianto a copertura totale del carico frigorifero richiesto dalla serra.

In un prossimo futuro è previsto l'utilizzo dell'impianto realizzato per soddisfare l'intero fabbisogno di un prototipo di serra a contenimento più piccola, da affiancare a quella esistente.

I principali componenti impiegati nel progetto della facility di prova sono di seguito elencati:

- Campo solare
- Gruppo frigorifero ad assorbimento;
- Torre evaporativa abbinata alla pompa di calore;
- Gruppi di pompaggio;
- Valvole di bilanciamento delle portate;
- Dry-cooler abbinato al campo solare per lo smaltimento del calore in eccesso;
- Serbatoio di accumulo termico;
- Scambiatori di calore a piastre;
- Caldaia integrativa ad alta temperatura;
- Quadro elettrico di potenza e controllo.

In Figura 387 si riporta lo schema funzionale dell'impianto realizzato a servizio della serra.

Per maggiori dettagli delle singole apparecchiature che costituiscono l'impianto e sulle loro caratteristiche si rimanda al rapporto RdS/2012/219 presente sul sito ENEA.

Sono state avviate le prime operazioni di taratura e controllo dell'impianto in funzione. E' in fase di elaborazione la logica di regolazione e controllo ed è in fase di ultimazione l'impianto di acquisizione dei dati di funzionamento. Appena le condizioni termoigrometriche esterne lo consentiranno, verrà avviato l'impianto e quindi inizierà la stagione di monitoraggio della facility di test per valutarne l'effettivo rendimento in reali condizioni di funzionamento.

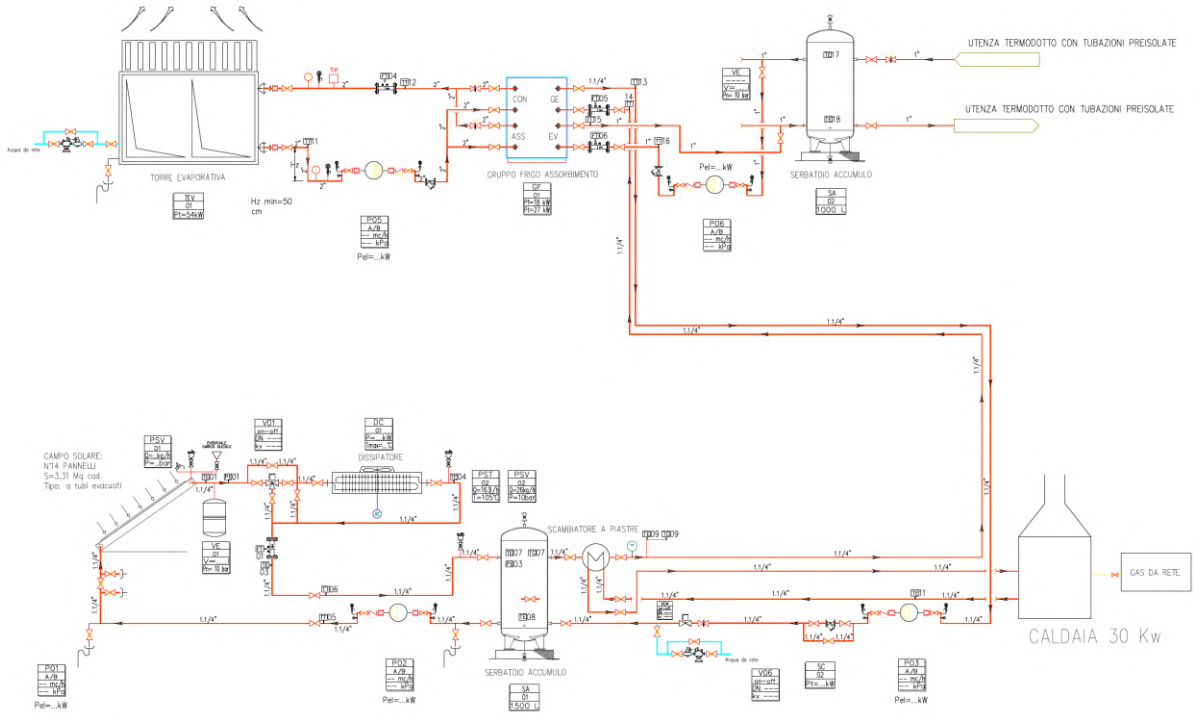


Figura 387. Schema funzionale centrale frigorifera

B. Caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling

Obiettivo generale di questa linea di attività è lo sviluppo di facility di test per la caratterizzazione energetica di componenti e sistemi solari destinati ad applicazioni di climatizzazione estiva ed invernale elio-assistite [Report RdS/2012/130].

B.1 Sviluppo di componenti solari a concentrazione per applicazioni di climatizzazione

Scopo della presente task è lo sviluppo di un prototipo di collettore solare compatto, costituito da un sistema integrato "concentratore/ricevitore", basato su ottiche del tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*) che focalizzano la radiazione solare su un ricevitore la cui geometria è stata opportunamente studiata al fine di massimizzare lo scambio termico con il fluido termovettore.

Per il raggiungimento di tale obiettivo sono stati messi a punto opportuni modelli che hanno permesso di determinare le configurazioni ottiche e termo-fluidodinamiche più adeguate all'applicazione d'interesse (l'accoppiamento a macchine frigorifere a bromuro di bitio a doppio effetto e/o a pompe di calore reversibili acqua/ammoniaca a ciclo avanzato). Tale sistema permetterà di raggiungere valori dell'efficienza termica dell'ordine del 50% a temperature di lavoro comprese tra i 150 e i 200 °C.

Sulla base di quanto detto, le attività si sono articolate nelle due fasi seguenti:

- modellazione ottica e termo-fluidodinamica di un collettore solare a concentrazione basato su un sistema ottico del tipo CPC
- sviluppo di un prototipo di collettore solare compatto, costituito da un sistema integrato "concentratore/ricevitore", che utilizza materiali e tecniche costruttive innovative.

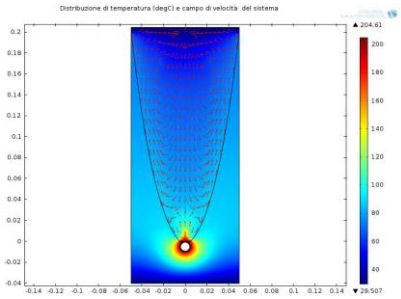
Modellazione ottica e termo-fluidodinamica di un prototipo di collettore solare a concentrazione

Sulla scorta dell'esperienza maturata nella precedente annualità, durante la quale si sono condotte attività teorico-sperimentali finalizzate allo sviluppo ed ottimizzazione energetica di componenti solari a concentrazione in collaborazione con aziende operanti nel settore delle applicazioni solari, è proseguito il lavoro di analisi numerica e prototipizzazione di componenti solari destinati ad applicazioni a media temperatura, introducendo elementi innovativi sia dal punto di vista delle geometrie che dei materiali da utilizzare per la loro realizzazione.

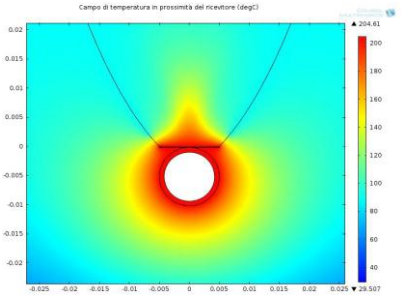
In particolare è stato sviluppato un prototipo di collettore solare compatto, costituito da un sistema integrato "concentratore/ricevitore", basato su un sistema ottico del tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*) che

focalizza la radiazione solare su un ricevitore a geometria piana e del quale è stato studiato il comportamento ottico e termo-fluidodinamico al fine di massimizzare lo scambio termico con il fluido vettore costituito da olio diatermico.

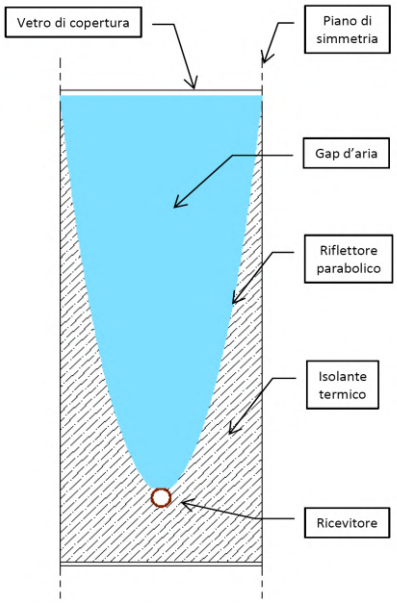
La Figura 388 mostra una vista in sezione di una porzione del concentratore che è stato concepito in forma modulare.



(a) Campo di temperatura in una sezione del concentratore



(b) Dettaglio del campo termico nelle vicinanze del ricevitore



(c) Vista in sezione di un modulo del concentratore

Figura 388. Sezione di una porzione del concentratore

Ciascun modulo è costituito da: un vetro superiore di copertura, due superfici paraboliche in alluminio ad alta riflettività (che costituiscono l'ottica CPC), un ricevitore composto da un tubo in rame con sovrapposta una piastra captante anche essa in rame con trattamento selettivo, un isolante di tipo innovativo che circonda la struttura e garantisce un adeguato isolamento alle temperature di lavoro richieste (150-200 °C). Sempre nella stessa figura sono riportati alcuni esempi di simulazioni termo-fluidodinamiche condotte al fine di ottimizzare gli scambi energetici tra sistema di captazione della radiazione solare, ricevitore termico e fluido termo-vettore. In particolare la prima delle due immagini mostra il campo di temperatura relativo ad una sezione del concentratore a cui è sovrapposto l'andamento del campo di velocità dell'aria racchiusa nell'intercapedine tra piastra captante e vetro di copertura. La seconda immagine mostra invece il dettaglio del campo termico nelle vicinanze del ricevitore.

Per stimare le prestazioni termiche del prototipo si è modellato il sistema sia con un algoritmo sviluppato in ambiente MATLAB sia mediante analisi agli elementi finiti utilizzando il software COMSOL Multiphysics. Il grafico in Figura 389 mostra gli esiti di tali simulazioni, dal cui confronto si evidenzia la diversa capacità dei singoli modelli di stimare le performance energetiche del prototipo a parità di condizioni operative. In particolare le analisi effettuate in ambiente Matlab, sebbene in sostanziale accordo con quelle effettuate con il Comsol, tendono a sottostimare l'efficienza del collettore a causa di approssimazioni nel modello numerico che determinano una sovrastima delle perdite termiche verso l'ambiente esterno.

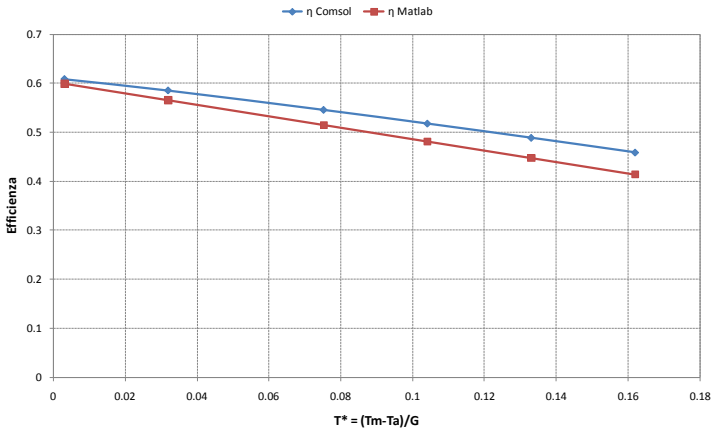


Figura 389. Confronto tra i modelli utilizzati per l'analisi energetica del prototipo

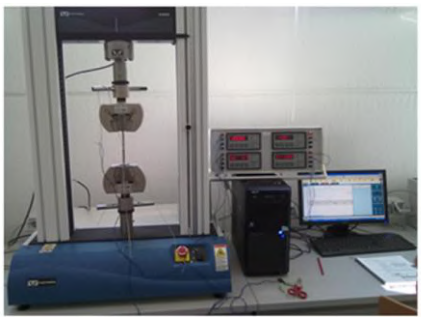
Sviluppo di un prototipo di collettore solare compatto che utilizza materiali e tecniche costruttive innovative

Alla fase di analisi modellistica del prototipo di concentratore solare è seguita quella della messa a punto di un prototipo sul quale effettuare una campagna di sperimentazione con lo scopo sia di validare gli algoritmi di calcolo messi a punto per la previsione delle performance energetiche del componente, sia di verificare in campo la bontà delle scelte progettuali adottate.

In quest'ambito una sostanziale parte delle attività di ricerca è stata dedicata alla scelta del materiale più idoneo a svolgere il ruolo di supporto della pellicola riflettente del paraboloide che, essendo parte integrante del sistema di captazione e conversione della radiazione solare, deve possedere oltre a elevate caratteristiche di robustezza e resistenza alle alte temperature, anche un alto grado di isolamento per evitare l'innescarsi di ponti termici che inevitabilmente deteriorerebbero le prestazioni dell'intero sistema, come evidenziato nelle numerose analisi modellistiche effettuate nella fase precedente.

Oltre al soddisfacimento delle proprietà di cui sopra, trattandosi di un'attività di ricerca a forte vocazione innovativa, non si è voluto relegare al materiale il solo compito di supporto alla pellicola riflettente ma si scelto di utilizzare un materiale che potesse svolgesse anche un ruolo "attivo" nel miglioramento e mantenimento dell'efficienza globale del sistema riflettente. In quest'ottica, la scelta è caduta su un materiale, la fibra di basalto, le cui caratteristiche sia fisiche che meccaniche superano di gran lunga le proprietà dei materiali convenzionalmente impiegati (leghe di alluminio, fibre di vetro, etc.). L'attività di ricerca vede coinvolto anche il Politecnico di Bari. L'attività di ricerca è stata rivolta inizialmente a determinare le prestazioni meccaniche secondo la norma ASTM D 3039/D 3039M-00 "Standard Test Method for Tensile Properties of polymer Matrix Composite Materials" e le cui proprietà ottenute sono riportate nella figura seguente.

Da una prima analisi, le caratteristiche meccaniche sono largamente superiori a quelle dei materiali convenzionali sopra elencati. Inoltre, le proprietà di isolamento termico sono migliori dell'alluminio, questa caratteristica consente di poten-ziare le proprietà di isolamento termico contribuendo ad una migliore efficienza della pellicola riflettente. E stata quindi verificata la formabilità del composito in fibra di basalto, realizzando un prototipo avente profilo semicilindrico ed utilizzando la tecnica del sacco a vuoto. Inoltre, dovendo realizzare una superficie interna del paraboloide tale da consentire un'ottima aderenza della pellicola riflettente, si è provveduto a disporre sulla superficie uno strato di Mylar che, oltre a ridurre drasticamente la rugosità superficiale, svolge l'ulteriore compito di isolante termico.



		Fibre volume fraction: 54,4%			
		strength	stdev	E-modulus	stdev
		[MPa]	[%]	[GPa]	[%]
Crossply	0°	687,5	3,4	27,6	4,3
	90°	685,3	2,6	28,3	1,5
	45°	112,2	6,7	15,1	1,9

Figura 390. Caratterizzazione meccanica della fibra di basalto e proprietà meccaniche ottenute

Figura 391. Foto che descrivono le varie fasi di realizzazione del prototipo iniziale con profilo semi-cilindrico

Dovendo, il paraboloide, essere parte attiva del sistema (possibilità di correggere il fuoco), si è provveduto a disporre sulla superficie una serie di dispositivi (termometri superficiali ed estensimetri) che hanno consentito di verificare, durante l'esposizione del prototipo alla luce solare prodotta da una Solar Box, le deformazioni lungo le tre direzioni principali. In tal senso si otterranno dati che consentiranno al modello matematico di essere validato dal punto di vista degli stress termo-meccanico con dati reali.

L'ulteriore fase di sperimentazione si è rivolta allo studio delle modalità di realizzazione di un prototipo del paraboloide ed avente sviluppo superficiale secondo quanto ottenuto dallo studio preliminare del modello numerico. È stato pertanto realizzato un supporto in 3D (Figura 392) da impiegare per la realizzazione del primo campione funzionale del paraboloide, tale da consentire di studiare in dettaglio le modalità di realizzazione del prototipo finale.

Figura 392. Supporto in 3D per la realizzazione del prototipo finale

B.2 Realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor

L'attività ha riguardato lo studio, la progettazione e la realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor (in accordo alla normativa tecnica di riferimento EN 12975:2006 – par. 6.1.5) su diverse tipologie di collettori solari, al fine di analizzare e verificare, in condizioni controllate, le loro performance energetiche in vista anche della validazione di modelli ottici e termo-fluidodinamici sviluppati nelle fasi precedenti dell'attività. In particolare l'attività ha riguardato la progettazione e realizzazione del sistema di generazione artificiale della radiazione solare da abbinare al circuito termo-idraulico già in dotazione al laboratorio per le prove indoor su collettori di diverse tipologie. Scopo di tale sistema è quello di generare in modo artificiale la radiazione solare da proiettare su una superficie disposta parallelamente al campo di lampade che genera il flusso luminoso richiesto e dove verrà posizionato un collettore solare per l'esecuzione di test indoor di efficienza termica.

Il simulatore solare in oggetto è costituito da un insieme di 24 proiettori del tipo PAR 64 da montarsi su una struttura di supporto già in dotazione al Laboratorio, ciascuno equipaggiato con una lampada agli alogenuri metallici della potenza di 1 kW, le cui caratteristiche e la cui disposizione sulla suddetta struttura sono tali da garantire un flusso luminoso che rispetti le specifiche richieste dalla normativa di riferimento sia per quanto riguarda l'uniformità di distribuzione della radiazione solare simulata (classe C secondo IEC 60904-9) sia per quanto riguarda la stabilità temporale (classe B secondo IEC 60904-9).

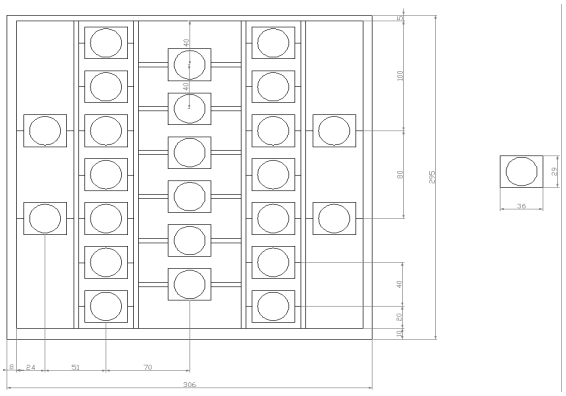


Figura 393. Schema quotato relativo alla disposizione delle lampade nel simulatore

In Figura 393 viene riportato lo schema quotato relativo alla griglia metallica su cui sono disposte le singole lampada che formano il sistema di generazione artificiale della radiazione solare.

Nella Figura 394 sono riportate le foto relative ai proiettori e alle lampade utilizzate per la realizzazione del simulatore solare. Inoltre è riportata una immagine di dettaglio del sistema di aggancio dei proiettori che consente l'orientazione manuale su due assi di ogni singola lampada. Tale opportunità consente di orientare i singoli fasci luminosi in modo da ottimizzare la distribuzione del flusso radiativo sulla superficie di riferimento.

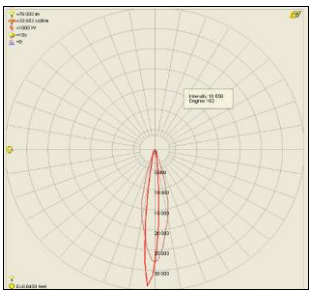
(a) Foto dell'alloggiamento di un singolo proiettore sulla struttura di supporto

(b) Foto del proiettore completo di lampada e vetro ottico

(c) Foto delle lampade agli alogenuri metallici utilizzate nel proiettore

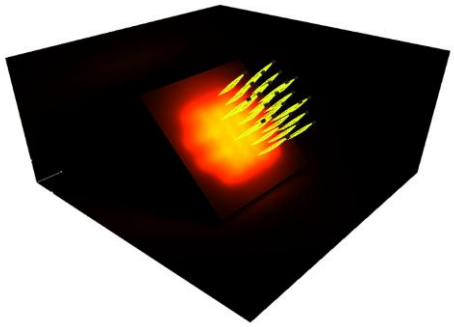
Figura 394. Proiettori e lampade utilizzati per la realizzazione del simulatore solare

Infine, la Figura 395 mostra la un esempio di analisi illuminotecnica, eseguita con software DIALux, che ha permesso di analizzare la distribuzione del flusso radiativo sulla superficie di riferimento inserendo come dati di input le caratteristiche geometriche e fotometriche delle lampade utilizzate. Ciò ha consentito di verificare la rispondenza del sistema di generazione artificiale della radiazione solare alle specifiche richiesta dalla normativa di riferimento per il testing di collettori solari termici.



(a) Fotometria caratteristica delle lampade utilizzate

(b) Rendering della fotometria di cui sopra



(c) Esempio di distribuzione del flusso radiativo generato dal campo di lampade del simulatore su una superficie di riferimento

Figura 395. Distribuzione del flusso radiativo sulla superficie di riferimento

B.3 Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi solari allo stato pre-industriale o di prototipo per applicazioni a bassa e media temperatura

L'attività ha come obiettivo la sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi solari in vista della loro utilizzazione sia in ambito residenziale per applicazioni di solar-cooling sia in ambito industriale per la produzione di calore di processo. Essa è stata sviluppata utilizzando le facility, già implementate nel corso delle annualità precedenti, del laboratorio di prova di collettori e sistemi solari del CR ENEA Trisaia che ha tra le sue finalità, oltre alla certificazione dei prodotti commerciali, anche quella di supportare l'industria nazionale nelle attività di ricerca, sviluppo e sperimentazione di componenti e sistemi innovativi, attraverso la caratterizzazione energetica e la verifica dell'affidabilità di componenti e sistemi allo stato pre-industriale o di prototipo.

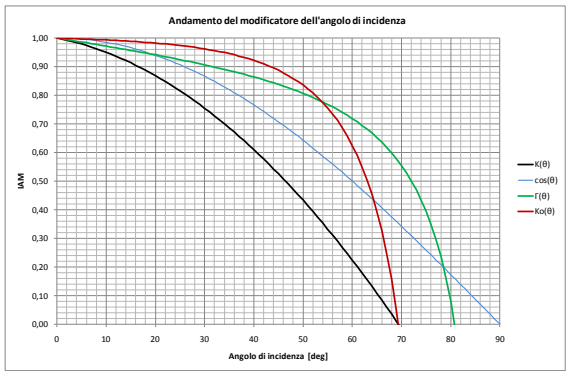
In particolare sono state approfondite le problematiche inerenti la caratterizzazione energetica di concentratori dotati di sistema ad inseguimento, quali collettori parabolici lineari e collettori a specchi di Fresnel, in relazione

alla dipendenza dell'efficienza termica dall'angolo con cui la radiazione solare diretta (DNI – *Direct Normal Irradiance*) incide sulla superficie di apertura (analisi dell'IAM – *Incidence angle modifier*).

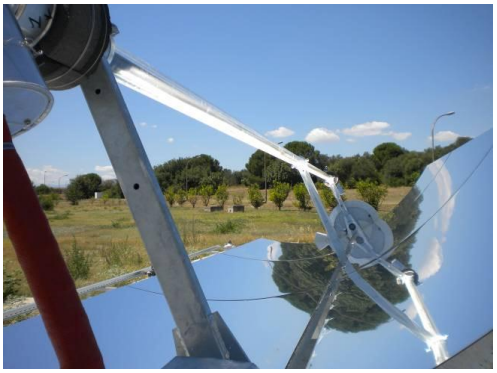
Inoltre, sono state avviate le prove preliminari su un sistema parabolico puntuale, del tipo Dish/Stirling, funzionante in assetto cogenerativo in grado quindi di produrre sia energia elettrica immessa direttamente in rete sia di produrre energia termica recuperando il calore di scarto derivante dal circuito di raffreddamento del motore Stirling.

Relativamente alla prima tematica, sono state condotte prove sperimentali in condizioni di incidenza non normale della DNI. Contestualmente sono state effettuate delle analisi teoriche con lo scopo di prevedere l'andamento dell'IAM in funzione dei diversi angoli di incidenza, tenendo conto delle caratteristiche ottiche e geometriche dei collettori considerati. I risultati di tali analisi sono stati confrontati con i dati sperimentali ottenuti.

Le Figure 397 e 398 seguenti mostrano alcuni esempi di tali analisi.

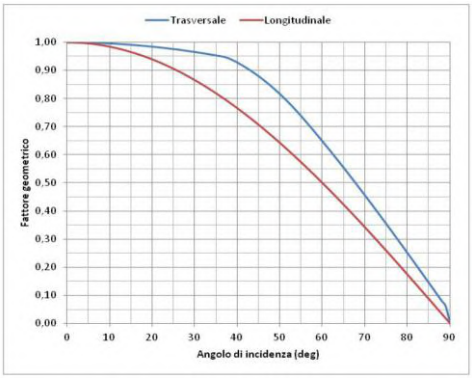


(a) Andamento delle diverse componenti dell'IAM per un collettore parabolico lineare



(b) Ricevitore PTC durante il test dell'IAM

Figura 396. Analisi teoriche e validazione sperimentale delle componenti IAM (a) e (b)



(c) Analisi dell'IAM per un collettore a specchi di Fresnel

(d) Ricevitore Fresnel durante il test dell'IAM

Figura 397. Analisi teoriche e validazione sperimentale delle componenti IAM (c) e (d)

Relativamente alla seconda tematica, è stato approntato il set-up sperimentale per l'esecuzione di test sul concentratore parabolico puntuale dotato di motore Stirling e sono state avviate le relative prove con lo scopo di analizzare le performance energetiche del sistema e valutare la frazione di energia termica prodotta rispetto alla produzione energetica totale.

Le foto seguenti mostrano il sistema in funzione durante la campagna sperimentale (Figura 398).

Figura 398. Set-up sperimentale del sistema Dish/Stirling

C. Partecipazione agli Implementing Agreement dell'IEA

L'obiettivo di questa linea di attività prevedeva il supporto ai Ministeri competenti attraverso la partecipazione a gruppi di lavoro internazionali della International Energy Agency. E' stata assicurata la partecipazione, quali rappresentanti italiani, ai lavori dell'Implementing Agreement "Solar Heating and Cooling" e "SolarPACES, Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems" della Agenzia Internazionale per l'Energia.

In particolare, nell'ambito IEA Solar Heating and Cooling si è proseguito nei lavori del Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration", Task 44 "Solar and Heat Pump Systems" e Task 48 "Quality assurance and support measures for Solar Cooling". Lo stato delle attività è descritto nel dettaglio nel rapporto tecnico RdS/2012/126.

Di seguito un riepilogo di quanto emerso dalle partecipazioni ai gruppi di lavoro IEA.

IEA Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration"

I lavori del Task 42/24, iniziati nel febbraio del 2009 a Bad Tölz, Germania, sono proseguiti nella seconda metà del 2010 con:

- Fourth Expert Meeting, September 27-28, 2010 - Graz, Austria
- Fifth Expert Meeting, February 20-21, 2011 - Belfast, Northern Ireland
- Sixth Expert Meeting, September 20-22, 2011 - Minneapolis, Minnesota, USA
- Seventh Expert Meeting, March 27-29,2012 – Tokyo, Japan

Nel mese di settembre 2011, il gruppo di lavoro del Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo ha partecipato ai lavori del sesto expert meeting, tenutosi presso il campus dell'Università del Minnesota (USA). In tale sede sono stati presentati gli ultimi avanzamenti della ricerca nel campo della modellazione del sistema PV-PCM alle differenze finite con l'approccio Crank-Nicolson.

- *Attività nell'ambito della WGB-Numerical Modelling Session*

Durante la session "Numerical Modelling" del Meeting tenutosi a Minneapolis (Settembre 2011) è stato presentato il software sviluppato in ambiente VB.net in grado di risolvere l'equazione di bilancio termico alle differenze finite scritte secondo il metodo di Crank-Nicolson. L'accuratezza di risoluzione del software è stata testata utilizzando la test facility presente presso il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo. È stato inoltre sviluppato uno strumento informatico in grado di generare un *Anno Tipo* o *Test Reference Year* (TRY), ovvero un anno costituito da 12 mesi, in cui ogni mese è stato selezionato come rappresentativo di un lungo periodo di osservazione.

Inoltre in vista della conclusione dei lavori della Task 42 il gruppo di lavoro sta partecipando alla redazione del Report finale che sarà pubblicato a cura della IEA.

IEA Task 44 - Annex 38 “Solar and Heat Pump Systems”

Le attività del TASK 44-Annex 38 sono prevalentemente indirizzate alle seguenti tipologie impiantistiche:

- riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria che usano le pompe di calore ed ogni tipo di collettori solari termici come componenti principali
- sistemi commercializzati come un unico prodotto da aziende/produttori e che sono installate da installatori
- pompe di calore alimentate da elettricità. Durante la ricerca metodologica sulla valutazione delle prestazioni si analizzeranno anche pompe di calore alimentate da calore.
- Soluzioni disponibili sul mercato e soluzioni innovative (prodotte durante il corso dell'Annex)

Esso è diviso in quattro Subtask:

- Subtask A: Panoramica sulle soluzioni (esistenti e nuove) e di sistemi generici (Fraunhofer ISE of Stuttgart, Germany);
- Subtask B: Valutazione delle prestazioni (Austrian Institute of Technology (AIT), Vienna);
- Subtask C: Modellazione e simulazione (SPF center, Rapperswil Switzerland);
- Subtask D: Disseminazione e supporto al mercato (EURAC Research Center, Bolzano, Italy).

L’Università di Palermo ha presentato il proprio lavoro al workshop “Key Technologies for Future Energy Systems” - Solar Heating and Cooling and Energy Storage (8 Novembre, 2011, Rosenheim, Germany) riguardante le attività dei task operanti nei programmi IEA Energy Conservation through Energy Storage (ECES) e Solar Heating and Cooling.

Il gruppo di ricerca, stabilito presso il Dipartimento dell’Energia dell'Università di Palermo, ha collaborato ai subtask B e C. Lo stato delle attività di questi subtask è descritto nel dettaglio nel rapporto tecnico RdS/2012/126.

IEA Task 48 “Quality assurance and support measures for Solar Cooling”

A seguito dei meeting di Marsiglia (settembre 2011) e Milano (Aprile 2012), il gruppo di lavoro del Dipartimento dell’Energia dell’Università di Palermo è stato investito della responsabilità di coordinamento di due sotto attività, inizialmente disgiunte, riguardanti l'analisi del ciclo di vita di componenti e impianti per il solar cooling. In particolare:

- A2 Life cycle analysis at component level;
- B3 Life cycle analysis at system level.

Si è concordato per l'anno in corso il seguente programma di lavoro:

- consolidare i risultati del task 38 mediante nuovi studi, incorporare e aggiornare le metodologie;
- ampliare il Life Cycle Inventory LCI component data base: intraprendere contatti con i costruttori di componenti;
- definire una metodologia di analisi semplificata;
- acquisire dati da esperienze progettuali e realizzative.

I partner coinvolti sono: Università di Palermo, Fraunhofer ISE, AIT, Università di Catania, SOLID, Kawasaki

In merito al metodo di analisi, a differenza di quanto svolto nell'ambito del Task 38 in cui si è utilizzato per la stima dei carichi termici e frigoriferi il software di simulazione dinamica TRNSYS, si è convenuto di utilizzare anche uno strumento semplificato.

- *Risultati ottenuti (località: Palermo (Italia), Rio de Janeiro (Brasile), Zurigo (Svizzera))*

Nei climi caldi (Palermo e Rio de Janeiro), i sistemi con l’impianto PV (fotovoltaico) grid-connected hanno fatto registrare le migliori performances, a causa dei bassi valori di GER (Global Energy Requirement, fabbisogno di energia primaria in tutto il ciclo di vita, espresso in MJ), GWP (Global Warming Potential, espresso in kg di CO_2 equivalente) e dei tempi di ritorno. Questa tipologia di impianti è differente dalle altre perché non richiede accumulo a causa dell’interazione libera con la rete. Per questa ragione, un confronto di questo sistema con gli altri non è significativo perché la forza del sistema solare termico H/C (heating and cooling) è l’abilità di ridurre la dipendenza dalla rete elettrica e di evitare i picchi, sovraccarichi e variazioni nella qualità della potenza. Altre due configurazioni sono state, quindi, analizzate per definire ulteriormente i sistemi assistiti da PV, in modo da minimizzare la loro interazione con la rete attraverso l’uso di accumuli di energia elettrica. Questi sistemi hanno ottenuto performances inferiori a quelle dei sistemi grid-connected e dei sistemi assistiti da solare termico in quasi tutti i casi analizzati. L’impatto della costruzione degli accumulatori è particolarmente elevato: solamente tecnologie più efficienti, dalla vita utile più lunga e più “verdi” possono ridurne l’impatto. Nei due casi di PV stand-

alone, il sistema che forniva l'energia pari al carico evitato dal sistema solare termico, ha fatto rilevare performances inferiori rispetto al sistema in grado di produrre il totale della domanda di elettricità (macchina frigorifera e sistemi ausiliari). Alcuni risultati contraddittori sono stati ottenuti per Rio de Janeiro, dove l'ampio fabbisogno di energia per raffrescamento durante tutto l'anno non è adeguatamente supportato da disponibilità di radiazione solare. Inoltre, l'alto valore dell'efficienza di conversione elettrica rende gli impianti solari H/C poco competitivi, fornendo invece un'opportunità per i sistemi assistiti da PV stand-alone. In Brasile, inoltre, se si considerano le variazioni del GWP e che la produzione elettrica è caratterizzata da un vasto utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili, in molti casi i sistemi convenzionali sono più convenienti dei sistemi assistiti da solare.

In climi più freddi (Zurigo), l'opportunità di estendere l'uso dei sistemi solari termici per coprire gli alti carichi termici invernali garantisce buone performances per i sistemi analizzati. Ciò non è altrettanto vero per i sistemi assistiti da PV, caratterizzati da alti consumi di gas naturale.

Partecipazione all'Implementing Agreement SolarPACES, "Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems"

L'attività dell'Italia, che ha aderito a SolarPACES nel 2009. Di seguito un breve sunto delle novità emerse durante la fine del 2011 e tutto il 2012.

- *Task I (impianti)*

E' iniziata un'attività di "applicazione prototipica" delle guidelines sulla prova dei sistemi solari di potenza (pubblicate nel maggio 2011) a un caso tipo. E' stato preso un accordo con la Acciona relativamente al Nevada Solar One. Verrà costituito un Advisory Committe formato dai principali Stakeholder (portatori di interesse, ovvero centri di ricerca, aziende e sviluppatori) di cui faranno parte: Sener, Brightsource, Solar Reserve, Abengoa, eSolar, NREL, SNL, CENER, Bechtel, SAIC.

- *Task II (produzione di idrogeno e combustibili sintetici)*

Il coordinatore della Task ha presentato l'idea di una Roadmap per iniziare a concretizzare l'applicazione industriale; questa attività sarà finanziata da SolarPACES. Attualmente sono interessate Australia e Sud Africa.

- *Task III (sviluppo componenti e tecnologie)*

Continuano le attività di sviluppo in appoggio alla normativa sui componenti, in particolare la misura delle prestazioni ottiche di specchi e ricevitori. L'ENEA partecipa alle attività di misura della riflettanza, e alle attività di misura della forma e delle prestazioni dei pannelli riflettenti.

E' stata realizzata alla PSA (Plataforma Solar de Almeria) una Multipurpose Molten Salt test facility, è stato prototipato un sistema di accumulo per sistemi a vapore diretto – ITES e messo a punto a livello commerciale (o pre-commerciale) un sistema ottico di verifica dei campi solari tramite fotocamere portate in volo da droni.

- *Task IV (calore di processo)*

Questo Task (Solar Process Heat for Production and Advanced Applications) è stato recentemente re-introdotto in collaborazione con il Task 49 del programma IEA SHC (Solar Heating and Cooling). La durata prevista è di 4 anni e l'obiettivo è sui sistemi per produzione di calore di processo fino a 400 °C, con o senza concentrazione, utilizzanti fluidi termovettori "convenzionali" (olio diatermico, acqua, vapore, aria).

Il Task è ulteriormente suddiviso in subtask:

A. Collettori solari;
B. Integrazione nel Processo e miglioramento del Processo;
C. Linee guida per la progettazione, Studio di casi applicativi, disseminazione dei risultati.

Le subtask sono a loro volta ulteriormente suddivise. Si tratta quindi di una attività di notevole respiro. Il contributo maggiore attualmente è da parte di Austria, Germania e Svizzera. Fra gli impianti citati come operativi, un impianto Fresenel a Bergamo (2006). Contributi italiani potrebbero venire in particolare sul versante delle installazioni di prova e sulla normativa, dato che ENEA ha un proprio impianto di prova al centro di Trisaia in grado di operare fino a 300 °C.

- *Task V (risorse solari)*

Nel corso dei lavori è emerso che l'attività di rilevazione e studio per la previsione delle caratteristiche solari si sta estendendo a tutto il mondo. Nelle regioni ad alto irraggiamento diretto (DNI) l'unico problema di incertezza

rispetto ai dati da satellite è la presenza di aerosol: a tale riguardo vi è una rete di stazioni denominata Aeronet (es. http://aeronet.gsfc.nasa.gov).

- *Task VI (sistemi applicati alla dissalazione)*

Continua lo studio di fattibilità, finanziato da SolarPACES, per un impianto da 50 MW con accumulo per produzione di elettricità e acqua dissalata a Port Safaga (Mar Rosso, Egitto).

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.

Università degli Studi Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale

Il Dipartimento svolge attività di ricerca nei settori della Chimica Organica e Inorganica, delle Costruzioni Aeronautiche e Aerospaziali, delle Costruzioni di Macchine, della Fisica Tecnica, della Fluidodinamica, dell'Ingegneria degli Scavi e delle Miniere, dell'Ingegneria Economico-Gestionale, delle Macchine a Fluido, delle Macchine e Azionamenti Elettrici, delle Misure Meccaniche Termiche e della Scienza e Tecnologia dei Materiali. L'Università di Roma TRE ha portato avanti l' "Analisi dati sperimentali e Simulazione di un impianto innovativo di solar heating and cooling a servizio dell'edificio F-92 del C.R. Enea di Casaccia" [Report RdS/2012/122].

Università di Palermo, Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM)

Il Dipartimento è stato costituito nel 1986 al fine di "organizzare e promuovere ricerche finalizzate alla produzione ed alla gestione delle fonti di energia e delle risorse energetiche ed ambientali, alla implicazione di esse nel rapporto uomo-ambiente ed alla conoscenza di fondamentali proprietà fisiche delle materie utili per le applicazioni nel campo energetico, astrofisico e spaziale". Il DREAM, nell'ambito dell'Obiettivo A, ha portato avanti lo "Studio e progettazione di un sistema di smaltimento statico del calore" .

Il Dipartimento DREAM ha partecipato inoltre alle attività dei gruppi di lavoro IEA - Solar Heating and Cooling, seguendo in particolare le Task 42 "Compact Thermal Energy Storage: Material Development and System Integration", Task 44 - Annex 38 "Solar and Heat Pump Systems" e Task 48 " Quality assurance and support measures for Solar Cooling" [Report RdS/2012/12a].

Università di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi industriali

Le attività del Dipartimento coprono le aree della conoscenza nell'ingegneria industriale e in quella economico-gestionale al fine di sviluppare nuovi prodotti, materiali e processi produttivi e organizzativi. L'Università di Padova ha portato avanti la "Progettazione di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase" [Report RdS/2012/125].

Università degli Studi della Calabria, Dipartimento di Meccanica

Le attività del Dipartimento di Meccanicacoprono diversi settori di ricerca nel campo della Fisica Tecnica, della Tecnologia e sistemi di lavorazione, della Meccanica applicata e bioingegneria, di Costruzione di Macchine, di Disegno e metodo dell'Ingegneria Industriale, di Impianti Industriali Meccanici e di Macchine e Sistemi Energetici. L'Università degli Studi della Calabria ha portato avanti l'"Analisi dati sperimentali e simulazione di una pompa di calore ad R744" [Report RdS/2012/123].

Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica Applicata e Condizionamenti Ambientali (DETEC)

Le attività del Dipartimento DETEC sono iniziate nel 1989, per iniziativa di docenti caratterizzati da una notevole omogeneità di interessi culturali. Nell'ambito dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, il DETEC raccoglie e coordina l'attività di ricerca di docenti e ricercatori che operano a livello scientifico nei settori disciplinari Fisica Tecnica Ambientale, Fisica Tecnica Industriale e Fluidodinamica. L'Università di Napoli Federico II ha portato avanti la "Progettazione costruttiva di un roof-top a pompa di calore ad R744" [Report RdS/2012/123 e 124].

Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Il settore dei trasporti assorbe una quota parte notevole dei consumi finali di energia che si assesta al 31% dell'energia primaria. Nel 2010 la domanda finale d'energia nel settore dei trasporti è stata di 42,4 Mtep, con una riduzione dello 0,2% rispetto al 2009. I consumi dei trasporti sono aumentati progressivamente fino al 2007, e hanno segnato dal 2008 un'inversione di tendenza a causa della crisi economica, che ha prodotto una riduzione dei consumi sia del trasporto passeggeri sia del trasporto merci. Dei consumi complessivi, circa i due terzi sono dovuti al trasporto passeggeri, la restante parte al trasporto merci, e sono entrambi dominati dalla modalità stradale: 89% dei consumi del trasporto passeggeri, addirittura il 93% di quello merci.

La Direttiva 32/2006/CE sull'efficienza energetica negli usi finali e sui servizi energetici richiede agli Stati membri di adottare un obiettivo nazionale indicativo di risparmio energetico al 2016, nono anno di applicazione della stessa Direttiva - pari al 9 % dell'ammontare del consumo di riferimento che è rappresentato dalla media dei consumi nei settori di uso finale nei cinque anni precedenti l'emanazione della Direttiva.

Per quanto riguarda il settore dei trasporti il miglioramento del livello di efficienza energetica è stato dal 2007 al 2010 di 2972 GWh/anno rispetto ai 3490 GWh/anno ed è sostanzialmente maturato grazie agli incentivi per la sostituzione del parco auto e dei mezzi per trasporto merci con pero inferiore a 3,5 t.[29]

Il raggiungimento degli obiettivi nazionali fissati nel Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica del 2007 e nel Piano d'Azione per le Energie Rinnovabili richiede anche l'adozione di misure finalizzate al miglioramento dell'efficienza energetica nel settore trasporti (che assorbono circa il 23% dei consumi totali del paese (43 Mtep su 185 Mtep totali, BEN provvisorio) ed all'utilizzo di energia da fonti rinnovabili, che dovrà arrivare nel 2020 a coprire il 10% dei consumi. Qualsiasi sia il tipo di propulsione ed il tipo di vettore per il trasporto sicuramente l'incremento di efficienza nello sfruttamento dell'energia primaria, sintetizzato molto spesso con l'acronimo anglosassone WTW (Well To Whell ovvero efficienza dal pozzo alla ruota), passa da una maggiore efficienza di conversione possibile attraverso un maggiore impiego di veicoli elettrici, dall'alleggerimento dei vettori per il trasporto ed allo sviluppo delle tecnologie di produzione ad esse correlate.

In particolare, l'impatto ambientale, in termini di CO_2/kWh alla ruota, della trazione termica è, infatti, mediamente, ben maggiore di quella elettrica. Un recente studio commissionato da Trenitalia ad ENEA, mostra che l'emissione di CO_2 per passeggero, su tratte servite dall'Alta Velocità è il 50% del trasporto su gomma. Lo stesso risultato risulta anche da uno studio di ATAC nel confronto tra i consumi effettivi di un autobus articolato da 18 metri ed un filobus di eguale capacità. Considerando invece i veicoli a batteria, anche se il maggior peso della versione elettrica ed il rendimento di carica e scarica dell'accumulo elettrico influiscono su consumi ed emissioni, questi restano però inferiori del 35-40% rispetto a quelle del corrispondente veicolo convenzionale (prove al banco in ENEA). Il confronto è fatto naturalmente a parità di servizio, quello urbano, il più adatto a valorizzare le peculiarità della trazione elettrica (autonomia limitata, niente consumi alle fermate, recupero d'energia in frenatura).

Allo stesso modo, la riduzione del peso è certamente il metodo più diretto per ridurre il consumo di carburate e di conseguenza le emissioni dei mezzi di trasporto. Si stima che una riduzione del 10% di peso porti ad una riduzione di carburante di circa il 7% e questo comporta che per ogni kg di peso risparmiato si riduca di circa 20 kg l'emissione annua di CO_2.

Il presente progetto quindi mira a sviluppare nuove tecnologie e componenti per perseguire il risparmio energetico nel settore dei trasporti. Il progetto prevede una prima linea di ricerca dedicata allo sviluppo di componenti a maggiore efficienza energetica per il veicolo elettrico; una seconda linea di attività che riguarda invece i nuovi materiali e tecnologie per l'alleggerimento dei veicoli; la terza linea ricerca dedicata ad una più ampia visione dell'efficienza energetica e della sicurezza dei componenti con l'analisi del Life Cycle Assessment energetico ambientale ed il Risk Assessment dei sistemi di accumulo.

[29] (ENEA 2011) Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2010

DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

Lo sviluppo dell'attività nell'arco della durata del programma e per le due principali linee di ricerca è il seguente:

Sviluppo di componenti innovativi

- Sviluppo di moduli Litio-Ione che rispondano ai criteri guida di: i) standardizzazione dei sistemi di gestione e controllo, disponendo di schede "slave" integrate, ii) scalabilità, che consenta ai piccoli produttori di veicoli e componentistica di estendere la gamma di prodotti disponibili anche in versioni elettrificate, iii) economicità delle soluzioni adottate, derivante anche dalle economie di scala consentite da i due punti precedenti, per avvicinarsi all'obiettivo di costo dei 300 €/kWh.
- Acquisizione, modifica e sperimentazione e sviluppo di BMS, sempre adattabili al concetto master/slave.
- Sperimentazione di sistemi d'accumulo misti (batterie + supercondensatori), con effettuazione di prove vita che evidenzino la maggior durata della batteria "assistita" e quantifichino i costi "a fine vita" del sistema, per un confronto con le altre soluzioni possibili.
- Realizzazione e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida (hardware e software) e distribuita, dotati di possibilità di colloquio con la rete e con i sistemi d'accumulo; studio di sistemi di accumulo misti "ad alta potenza specifica in carica/scarica" e delle relative strategie di gestione, che rispondano alle specifiche dei sistemi di ricarica extrarapidi.
- Effettuazione del Life-Cycle Assessment energetico-ambientale e di Risk Assessment delle tecnologie suddette.

Sviluppo di materiali

- Studio e sviluppo di processi per la fabbricazione di materiali metallici cellulari: processi di fabbricazione di materiali metallici cellulari a base di leghe di alluminio basati sulla MP e/o sull'iniezione di gas nel fluido, definizione delle miscele lega additivi ottimali per l'omogeneizzazione della distribuzione della dimensione delle celle, e dei parametri operativi di processo gradienti termici di riscaldamento e raffreddamento.
- Sviluppo delle tecnologie di giunzione fra AFS e estrusi in lega di alluminio con lo sviluppo di un protocollo di qualificazione basato sul test di flessione su quattro punti. Lo stesso test sarà utilizzato per definire l'efficienza di giunzione fra AFS e fra AFS ed estrusi di alluminio.
- Sviluppo di procedure di progettazione e simulazione del comportamento di componenti per l'alleggerimento strutturale di vettori per il trasporto: codici di calcolo per la modellazione del comportamento di diverse tipologie di componenti in schiuma di alluminio e del comportamento di componenti complessi realizzati da pannelli AFS ed estrusi in alluminio validati sulla base dei test meccanici sperimentali; realizzazione di componenti prototipali e loro caratterizzazione per la validazione delle metodologie di modeling.
- Sviluppo di pannelli in WPC (Wood Polymer Composite) rinforzati con fibre lunghe di canapa per cercare di migliorare le proprietà meccaniche, mediante l'impiego di fibre sciolte distribuite casualmente o in strati monodirezionali e di pannelli in materiale composito riciclabile a base di resine biodegradabili (PLA-acido polilattico) rinforzate con fibre naturali vegetali anche in forma di tessuto. Verranno anche realizzati pannelli in materiale composito a partire da tessuti pre-impregnati di tipo "commingled", quali PLA/Fibre di lino e PLA/Fibre di canapa. Realizzazione di componenti prototipali e loro caratterizzazione, finalizzati alla realizzazione di *interiors* a basso costo e peso ridotto.
- Scale-up del processo di realizzazione delle sfere cave basato sulla metallurgia delle polveri (finalizzata alla produzione di materiali cellulari ibridi a base di resine termoplastiche), con specifico riferimento a quanto riguarda la razionalizzazione delle attrezzature di laboratorio attualmente utilizzate.

RISULTATI DELL'ATTIVITÀ

A. Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS ed accumulo misto

A.1 Sviluppo di moduli integrati, completi di BMS (battery management system)

Il presente obiettivo mira allo sviluppo di moduli standard da 12 V, realizzati con batterie al $LiFePO_4$ individuate nella precedente annualità (PAR 2008-09). Per modulo si intende l'insieme costituito da quattro batterie connesse in serie, più il sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), il sistema di raffreddamento e la meccanica. Per standard si intende che lo stesso modulo può essere impiegato per più applicazioni: lo studio condotto in precedenza, infatti, ha dimostrato che realizzando tre moduli standard da 30, 60 e 100 Ah è possibile

raggiungere i livelli di tensione/amperora richiesti da tutte le possibili applicazioni nel campo dell'avviamento/ alimentazione ausiliari (anche nel settore nautico) e trazione di veicoli elettrici off-road. Più moduli della stessa tipologia possono essere connessi in combinazioni serie/parallelo per costruire sistemi batterie con le caratteristiche richieste.

A proseguimento di quanto svolto in precedenza, l'obiettivo prevedeva le seguenti attività:

- esecuzione di prove su campioni delle batterie al litio selezionate nell'anno precedente, per confermarne la possibilità di impiego nelle applicazioni individuate (avviamento e trazione di veicoli elettrici off-road);
- studio del comportamento termico delle batterie e definizione della modalità di raffreddamento (ad aria, o ad acqua) per il modulo batterie sopra definito;
- valutazione in esercizio di BMS commerciali di varie tipologie, al fine di scegliere quella più idonea ed emettere le specifiche definitive per il sistema elettronico di controllo (BMS) del modulo batterie;
- realizzazione del BMS, del sistema di raffreddamento e della struttura meccanica per la costruzione di: un modulo di avviamento 12 V-30 Ah, un modulo di trazione 12 V-30 Ah, un modulo di avviamento 12 V-60 Ah, un modulo di trazione 12 V-60 Ah, un modulo di trazione 12 V-100 Ah, un dimostratore consistente in un sistema batterie 48 V-100 Ah (adatto per l'alimentazione di un piccolo mezzo da giardinaggio) costituito dalla connessione in serie di 4 moduli di grande taglia.

Prove su batterie

Su campioni di batterie al $LiFePO_4$ da 30, 60 e 100 Ah, presso il Laboratorio Prova Batterie del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA sono state eseguite prove a vari regimi di scarica (1C, 2C, fino al massimo rate di scarica continuativa, 3C, consentito dal costruttore) e varie temperature (0 °C, +23 °C, +40 °C), prove di carica rapida (ad 1C, massima velocità di carica consentita dal costruttore, corrispondente alla ricarica teorica in un'ora), prove per il calcolo della resistenza interna. Col termine nC si intende il valore di corrente pari ad n volte la capacità nominale della batteria. Infine, su campioni di batterie da 30 e 60 Ah selezionate, oltre che come batterie di trazione, anche per l'applicazione come batterie d'avviamento, sono state eseguite prove d'avviamento a freddo.

Le figure 399-402 riportano in forma grafica e sintetica l'andamento della campagna di prove, a cui le batterie hanno risposto in modo soddisfacente e pertanto sono state confermate per il proseguimento dell'attività.

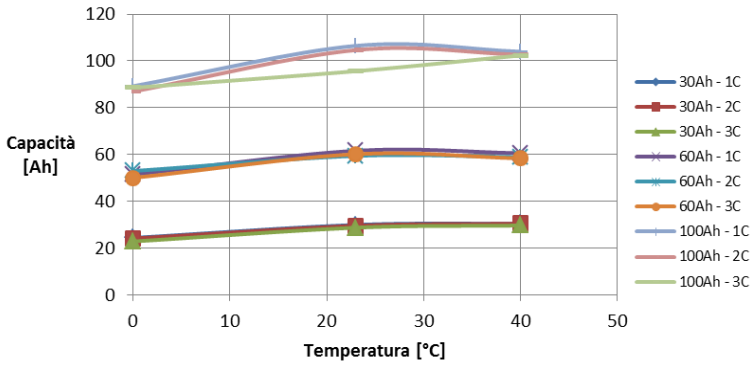


Figura 399. Prove di capacità

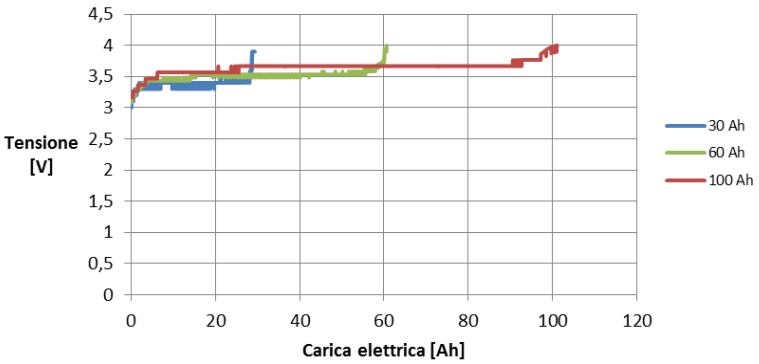


Figura 400. Prove di carica rapida 1C

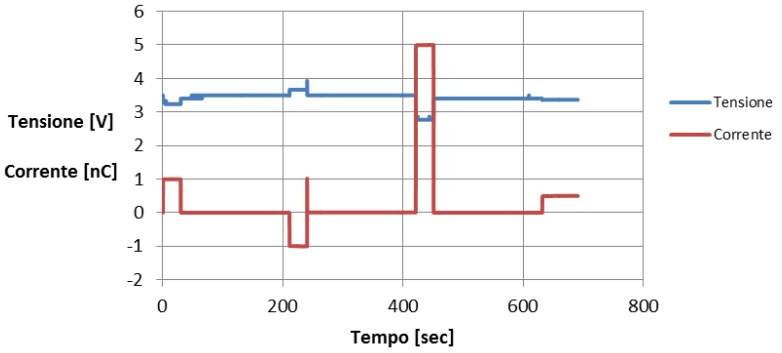


Figura 401. Andamento di tensione e corrente nella prova di resistenza interna

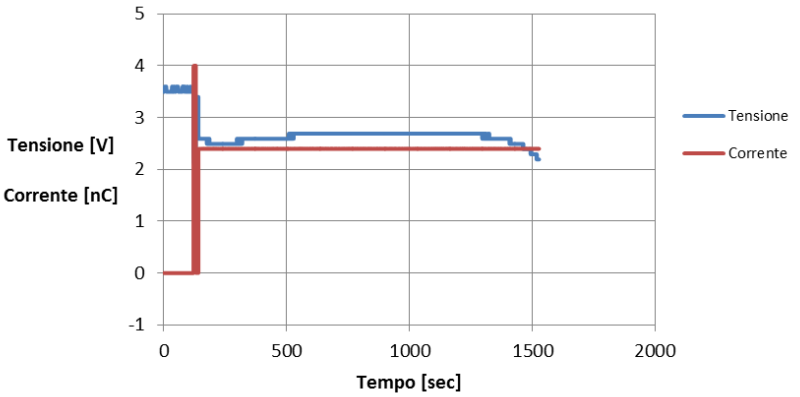


Figura 402. Andamento di tensione e corrente nella prova di avviamento a freddo per la batteria da 60 Ah

Studio del comportamento termico delle batterie

E' stata effettuata un'analisi termica, inizialmente a livello di singola cella, consistente nella rilevazione del campo termico per mezzo di termocoppie ed una termocamera durante prove di carica e scarica, con lo scopo di valutare le necessità di raffreddamento delle batterie durante le fasi di esercizio e eventuale riscaldamento nell'avviamento a freddo. L'analisi è stata condotta su campioni del modello di batteria da 100 Ah, la più grande fra le taglie scelte, effettuando delle termografie sulla batteria in esercizio nelle condizioni più impegnative: i risultati hanno evidenziato l'esistenza di un "punto caldo", ove si registrano le temperature maggiori, situato leggermente al di sotto del polo negativo (Figura 403). Ciò ha costituito un'utile indicazione per il posizionamento più idoneo del sensore di temperatura a cui affidare il monitoraggio termico nel modulo batterie. Inoltre, è emerso che le condizioni critiche di temperatura vengono raggiunte solamente in prossimità della fase finale di scarica alle condizioni più impegnative (massimo C-rate) e pertanto solo in tale fase la batteria necessita di essere raffreddata.

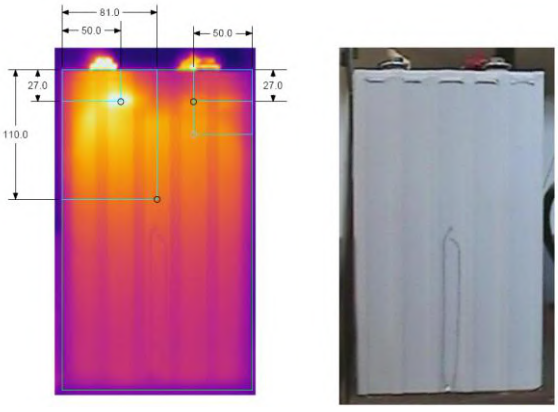


Figura 403. Batteria strumentata con termocoppie (destra) e relativa immagine con termo camera (sinistra)

Successivamente, lo studio è stato condotto a livello modulo, cioè con quattro batterie affiancate, lasciando un opportuno spazio tra l'una e l'altra: allo scopo è stato costruito un circuito di scambio termico ad aria ed uno ad acqua per valutare e confrontare l'efficienza dei due modi di raffreddamento.
La Figura 404 rappresenta lo schema dell'impianto di raffreddamento ad aria e la Figura 405 ne mostra la sua realizzazione presso i locali del Centro Casaccia dell'ENEA. Poiché la caratterizzazione termica dianzi descritta aveva evidenziato ridotte necessità di raffreddamento delle batterie, così da poter ritenere sin dall'inizio che l'aria potesse svolgere idoneamente la funzione di fluido refrigerante, lo studio del raffreddamento ad acqua ha subito un ridimensionamento, e quindi il relativo impianto di prova è stato realizzato in una versione molto semplificata, a mo' di vaschetta, con un ingresso ed un'uscita dell'acqua a portata regolabile mediante un rubinetto, in cui le batterie sono state immerse fino ad un certo livello e fatte lambire dall'acqua. Ciò è stato possibile in considerazione dell'ermeticità dell'involucro delle batterie (si veda in proposito ancora la Figura 403, destra) ed ha consentito di effettuare comunque una sperimentazione, seppure indicativa, risparmiando gli oneri della costruzione di un circuito sofisticato. Per ragioni opposte, invece, l'impianto di raffreddamento ad aria è stato progettato e costruito con tutti gli accorgimenti del caso. La sperimentazione eseguita ha mostrato la superiorità dell'acqua come mezzo di scambio termico, ma ha altresì confermato la possibilità di effettuare il raffreddamento con aria. Nella conferma finale del raffreddamento ad aria, oltre all'aspetto tecnico sono state tenute in conto considerazioni relativamente ai costi che richiederebbe la realizzazione di un impianto ad acqua, a circuito chiuso, quindi con due scambiatori, tenute, etc., per cui alla fine il raffreddamento ad aria è risultato quello che esprime il miglior compromesso tecnico-economico.

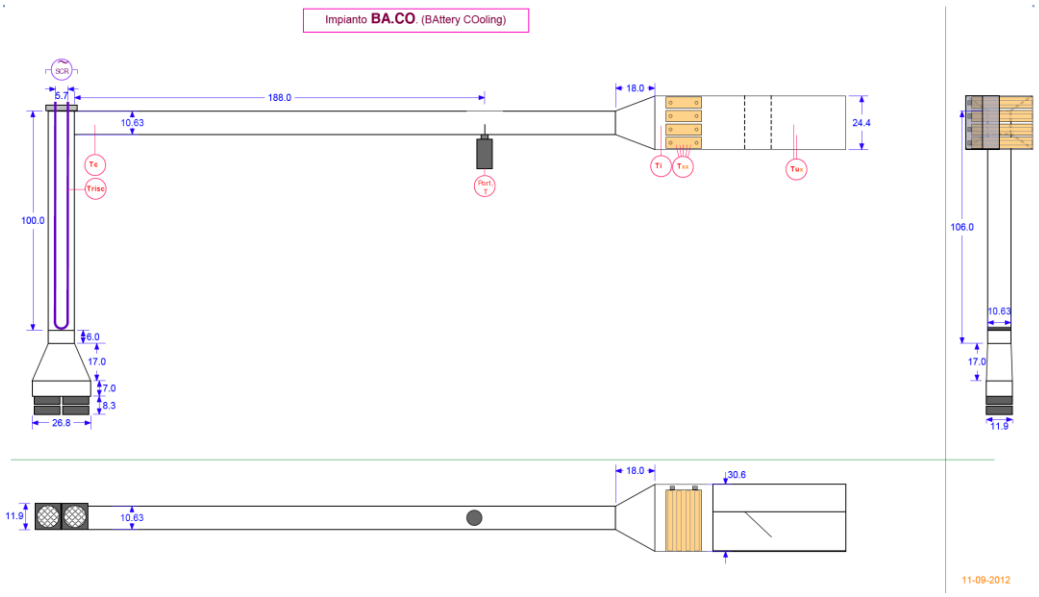
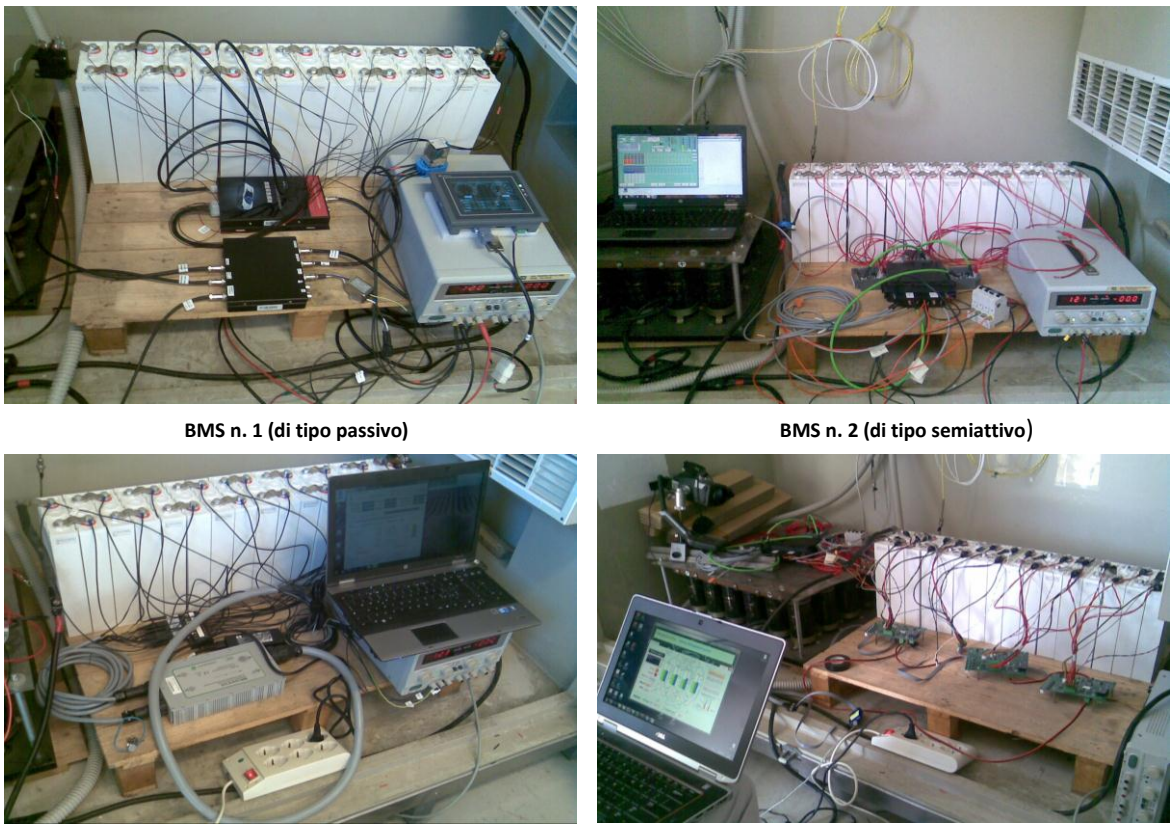


Figura 404. Schema dell'impianto di raffreddamento ad aria

Figura 405. Realizzazione dell'impianto di raffreddamento ad aria

Valutazione in esercizio di BMS commerciali

Relativamente al sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), sono stati posti in funzione i sistemi commerciali di diversa tipologia approvvigionati nella precedente annualità, per i quali era stato fatto un confronto a livello di specifica ma non era stato possibile effettuare una prova di confronto in esercizio perché consegnati a ridosso della scadenza delle attività. Dei tre sistemi commerciali approvvigionati, due sono con bilanciamento di tipo passivo (le batterie più cariche sono scaricate su elementi dissipativi, i.e. resistenze) ed uno di tipo semiattivo. L'Università di Pisa ha fornito un BMS di propria concezione, con bilanciamento di tipo attivo (le celle più cariche vengono scaricate a vantaggio di quelle meno cariche, evitando in tal modo dissipazioni energetiche). Le prove sono state svolte sottoponendo a cicli di carica e scarica un sistema composto da 16 batterie connesse in serie per una tensione totale nominale di 48 V, a cui è stato collegato il BMS in esame. I cicli di carica e scarica sono stati realizzati per mezzo di ciclatori presso l'ENEA.



BMS n. 1 (di tipo passivo) **BMS n. 2 (di tipo semiattivo)**

BMS n. 3 (di tipo passivo) **BMS n. 4 (di tipo attivo)**

Figura 406. BMS in esercizio

I sistemi elettronici sono stati confrontati con riguardo ai seguenti aspetti tecnici:

- funzione di protezione (disconnessione del sistema batterie al verificarsi di situazioni anomale di esercizio, attraverso l'apertura di contattori posti in serie al sistema batterie, in corrispondenza dei poli);
- funzione di monitoraggio (visualizzazione delle tensioni delle singole batterie e dei parametri globali del sistema batterie);
- funzione di acquisizione dati (registrazione dei valori visualizzati);
- funzione di equalizzazione (livellamento delle tensioni delle singole batterie).

Inoltre è stata fatta un'analisi di costo dei BMS esaminati. A valle del confronto tecnico-economico così eseguito, si è deciso di adottare nel modulo batterie finale il sistema di controllo con bilanciamento di tipo attivo, che è risultato essere quello con il migliore rapporto costo-prestazioni, completando così la specifica preliminare emessa nell'annualità precedente. Sono state formalizzate all'Università di Pisa le richieste per trasformare/specializzare il BMS inizialmente fornito in conto prova secondo le particolarità dell'applicazione nei moduli batterie. Sulla base di tali richieste, brevemente descritte nel paragrafo successivo, l'Università di Pisa ha realizzato la progettazione della versione finale del BMS

.

Realizzazione dei moduli standard

Le prove di caratterizzazione ad alta temperatura condotte sulle singole batterie e l'analisi termica condotta prima a livello di singola batteria e poi a livello di modulo, hanno dimostrato che quest'ultimo ha limitate esigenze di raffreddamento ed è sufficiente uno scambio termico ad aria. Le prove di caratterizzazione a bassa temperatura e le prove d'avviamento a freddo hanno dimostrato che non è necessario un riscaldamento durante il funzionamento a freddo. Sulla base di queste considerazioni, il sistema di gestione termica del modulo è stato realizzato mediante tre ventilatori 50 x 50 x 20 mm da 12 V_{dc} che si alimentano direttamente dal modulo (assorbimento complessivo 500 mA) e si attivano quando la temperatura registrata dai sensori posti sulle singole batterie raggiunge il valore +45 °C. Detti ventilatori sono posti sul coperchio del modulo ed aspirano l'aria attraverso le aperture realizzate nella parte inferiore delle superfici laterali del modulo, lambendo le batterie attraversando l'interspazio appositamente lasciato tra di esse per creare i canali di ventilazione, nel percorso dal basso verso l'alto fino all'uscita sul coperchio. Le caratteristiche di portata e prevalenza di ciascun ventilatore sono: 34,5 Nm^3/h, 75,5 Pa @7000 giri/min.

Relativamente al sistema elettronico di controllo, ogni modulo è equipaggiato con una scheda elettronica, la stessa per tutte le tipologie di modulo, a vantaggio della standardizzazione, che può assumere (in fase di configurazione) la funzione di master o slave. Infatti, la particolarità del BMS realizzato risiede, oltre che nella tecnica di bilanciamento attivo, molto nota in letteratura ma altrettanto difficile a trovarsi in pratica, nella flessibilità: la programmazione consente di "battezzare" un qualunque modulo come master e di impostare la configurazione del sistema, cioè dire quanti moduli sono presenti e come sono connessi a costituire il sistema batterie nel suo complesso. Il BMS protegge, monitorizza e bilancia le quattro batterie che sono all'interno del modulo (bilanciamento intra-modulo), nel caso dell'impiego di più moduli interconnessi è anche possibile il trasferimento di energia da un modulo ad un altro (bilanciamento inter-modulo). I BMS slave comunicano tra loro e con il BMS master il quale, a sua volta, comunica con l'esterno (centralina veicolo o pc) per la trasmissione dei dati, degli avvisi e degli allarmi, nonché per la registrazione degli stessi.

Una volta definiti il sistema elettronico di controllo e quello di raffreddamento, si è passati alla realizzazione della struttura meccanica di sostegno e contenimento del modulo (in materiale plastico ignifugo ad alta resistenza meccanica) che alloggia quattro batterie, i ventilatori, la scheda elettronica di controllo ed i collegamenti di segnale e di potenza.

Causa le diverse dimensioni delle batterie in funzione della taglia, è stato necessario realizzare tre involucri: uno per i moduli da 30 Ah (avviamento e trazione), uno per quelli da 60 Ah (avviamento e trazione) ed uno per quello da 100Ah (il modulo da 100Ah è solo per l'applicazione di trazione). Il sistema di gestione termica è invece lo stesso: tutti i moduli montano sul coperchio i tre ventilatori. Detto sistema, essendo ottimizzato per il modulo da 100 Ah, risulterà sovradimensionato per quelli da 30 e 60 Ah: si è preferito adottare questa scelta a vantaggio della standardizzazione (nell'ottica di una produzione di serie, sfruttare la riduzione dei costi legata alla quantità), ed in considerazione del fatto che, nel caso dei moduli da 30 e 60 Ah, il sovradimensionamento si traduce in un tempo di raffreddamento inferiore delle batterie. Anche la scheda elettronica è la stessa per tutti i tipi di modulo, e viene collocata verticalmente in corrispondenza della mezzeria del modulo scorrendo in guide prismatiche che ne consentono il montaggio ed il fissaggio: l'adattamento della scheda elettronica alle diverse dimensioni dei moduli è ottenuto realizzando guide di larghezza diversa; in tal modo l'elettronica rimane completamente universale (sempre come elemento di standardizzazione) mentre si è lasciata alla meccanica, che comunque non avrebbe potuto essere standardizzata completamente a causa delle diverse dimensioni delle batterie, l'incombenza dell'adattamento.

Nella Tabella 77 si riportano le dimensioni finali dei moduli, evidenziando di fianco il gruppo BCI (che definisce gli standard dimensionali per batterie al piombo) in cui è possibile collocarli con riferimento alle dimensioni in pianta (dimensione del modulo inferiore o compatibile con quella del gruppo BCI).

Tabella 77. Dimensioni dei moduli

Tipo	Dimensioni	BCI G.N.	Dimensioni del BCI G.N.
Modulo da 30Ah	277 x 160 x 208	48	278 x 175 x 190
Modulo da 60Ah	297 x 166 x 236	27	306 x 175 x 225
Modulo da 100Ah	310 x 186 x 318	76	334 x 179 x 216

L’assieme costituito dalla struttura meccanica, le quattro batterie, il BMS ed il sistema di gestione termica, con le relative connessioni interne di potenza e di segnale, costituiscono il modulo finito, che può essere utilizzato per applicazione isolata (batterie per avviamento ed alimentazione ausiliari) e combinata (sistemi batterie completi per trazione).

Sono stati realizzati due moduli per avviamento, di piccola e grande taglia (30 e 60Ah), e tre moduli per trazione, di piccola, media e grande taglia (30, 60 e 100 Ah), In Figura 407 si riportano i disegni dei moduli da 60 e 100 Ah.

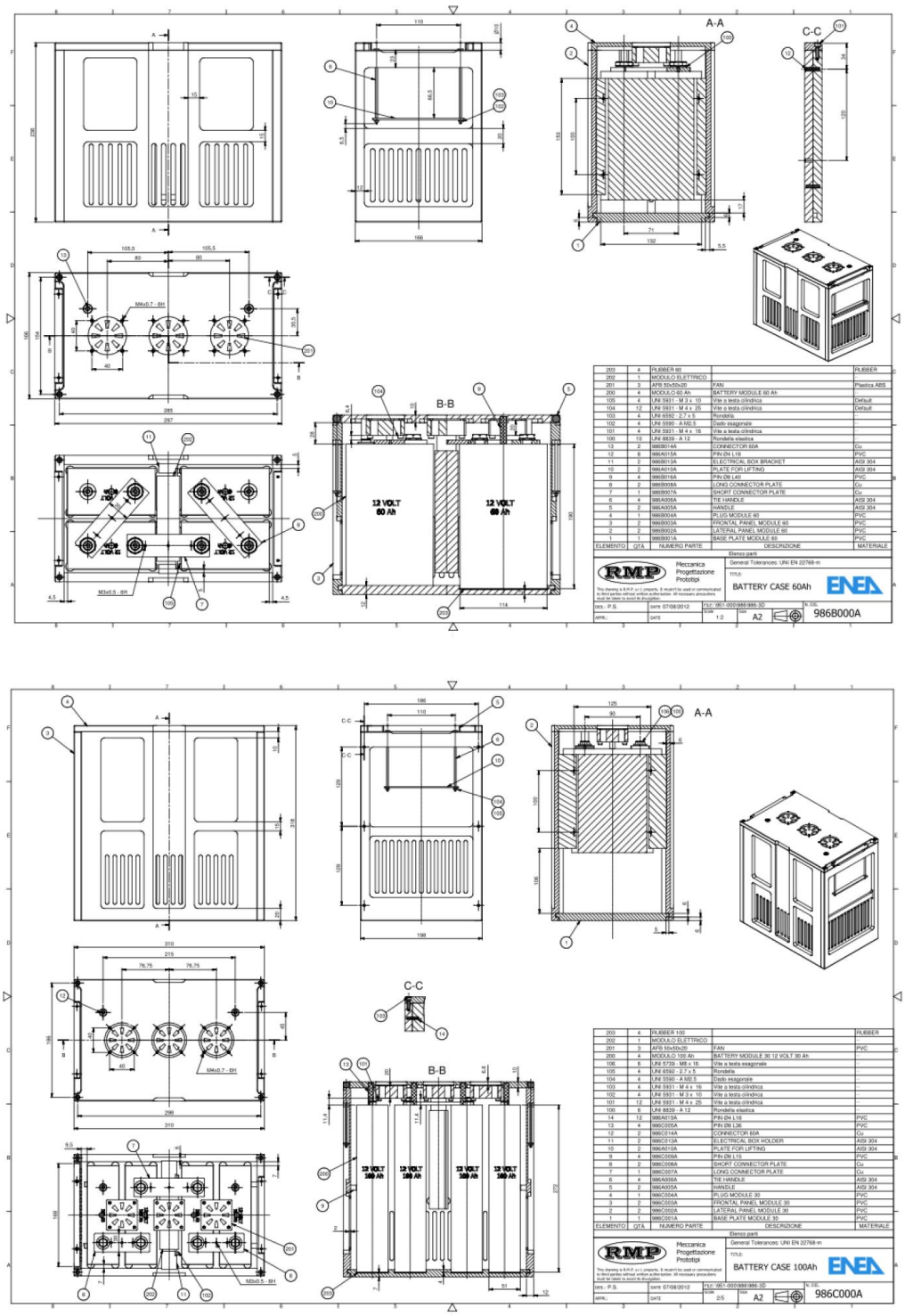


Figura 407. Modulo da 60 Ah e da 100 Ah

Inoltre, come dimostratore è stato realizzato un sistema batterie per trazione da 48 V-100 Ah, costituito da quattro moduli standard da 100 Ah connessi in serie, ciascuno dotato del proprio BMS di modulo, con un modulo che assume il ruolo di BMS master.

Per maggiori dettagli sui risultati dell'attività A1 si rimanda ai rapporti:

- RdS/2012/087 Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive
- RdS/2012/088 Sviluppo di un Battery Management System (BMS) con bilanciamento attivo per sistema batterie al $LiFePO_4$ da 48 Vn - 100 Ah
- RdS/2012/089 Progettazione definitiva del Battery Management System (BMS) per batterie di avviamento e trazione non automotive.

A.2 Sistemi d'accumulo misti

Quella dell'accumulo misto, con batterie al piombo e supercondensatori, è una tecnologia già studiata nell'ambito delle attività di ricerca svolte nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma, sia dal punto di vista delle interfacce di potenza che delle valutazioni tecnico-economiche.

Brevemente, le batterie al piombo-acido rappresentano la tecnologia di accumulo maggiormente consolidata e sperimentata: una limitazione rispetto agli accumuli elettrochimici più innovativi, specialmente nella trazione elettrica stradale (molto di meno negli usi interni di stabilimento dei veicoli industriali), risiede nel fatto che l'energia estraibile, oltre ad essere ridotta, è dipende fortemente dal profilo della corrente di scarica mentre la potenza di picco diminuisce con il progredire della scarica, svantaggio particolarmente penalizzante negli usi di veicoli elettrici a trazione autonoma, le cui prestazioni sarebbero decrescenti durante l'uso. In modo duale, i sistemi d'accumulo basati sulla tecnologia a supercondensatori presentano un'elevata densità di potenza, anche se un'energia specifica molto piccola. L'accoppiamento di un sistema "a supercondensatori" con una batteria piombo-acido consente di mantenere gli aspetti positivi delle batterie piombo-acido e di correggerne i difetti.

Inoltre, la possibilità di disporre di sistemi d'accumulo di potenza da accoppiare a sistemi d'accumulo piombo-acido permette di realizzare una funzione di peak-shaving al fine di ottenere, oltre ai benefici sopra accennati, una maggior durata delle batterie piombo-acido: tanto maggiore è la possibilità del dispositivo di accumulo elettrochimico di funzionare a corrente costante, tanto più la vita, in termini di numero di cicli, si avvicina ai valori dichiarati dai costruttori.

L'obiettivo della presente linea di attività pertanto prevedeva l'esecuzione di prove vita con e senza supercondensatori, per valutare l'incremento di durata delle batterie al piombo-acido.

Inoltre, nel corso della precedente annualità è stata effettuato uno studio sull'invecchiamento delle batterie, con particolare riferimento agli accumuli misti di batterie al piombo e supercondensatori, ove, sulla base di una serie di prove effettuate in ENEA, è stata proposta un'ipotesi di correlazione tra vita utile delle batterie e potenza di picco da esse prelevata. L'obiettivo della presente attività prevedeva anche la verifica di tale correlazione.

Sperimentazione [Report RdS/2012/121]

La sperimentazione è stata eseguita caratterizzando pacchi batterie piombo-acido con cicli di carica-scarica corrispondenti a due configurazioni: "pura", cioè solo batterie, ed "assistita", cioè con batterie assistite da un banco di supercondensatori. A tal fine, sono stati preparati due pacchi batterie uguali e sono stati sottoposti, nello stesso periodo e nelle stesse condizioni ambientali, a "prove vita" fino a raggiungere la condizione di "fine vita utile" che, per batterie automobilistiche, corrisponde alla riduzione della capacità del 25% rispetto al valore nominale. Il profilo di carico del primo pacco corrisponde a quello di un accumulo elettrico veicolare in configurazione "pura", il profilo di carico del secondo pacco corrisponde a quello di un accumulo elettrico veicolare in configurazione "assistita": diversamente da quanto ipotizzato nel piano di attività, le prove sono state eseguite senza interfaccia e senza supercondensatori, perché in questo modo:

- si è assicurato uno svolgimento più regolare delle prove, svincolato da ogni problematica inerente il corretto funzionamento dell'interfaccia di potenza dei supercondensatori,
- si è ridotto alla sola potenza di picco prelevata dalle batterie il numero delle variabili in gioco che influenzano la vita utile delle batterie.

A tale scopo, il valore del picco di potenza per il pacco in configurazione "assistita" è stato posto uguale alla metà del picco di potenza del pacco in configurazione "pura" e sono state eliminate le fasi di recupero energetico corrispondenti alle ricariche in frenata, perché è stato ipotizzato che il recupero venisse fatto interamente con i supercondensatori. Il tutto a parità di energia scaricata, per ciclo, dai due pacchi.

Le batterie sfuse da 12 V, in numero di sei, sono state selezionate e testate individualmente per poi essere assemblate e strumentate in due pacchi da 36 V nominali (Figura 408).

Figura 408. Assemblaggio dei pacchi (sinistra) e collegamento al ciclatore (destra)

Il ciclo vita è derivato, com'è d'uso , dalla parte urbana del ciclo ECE15 ed è rappresentato in Figura 409. Per ridurre i tempi di sperimentazione e renderli compatibili con la durata del programma, i valori delle potenze specifiche massime richieste all'accumulo sono stati raddoppiati rispetto a quelli previsti dalla procedura EUCAR.

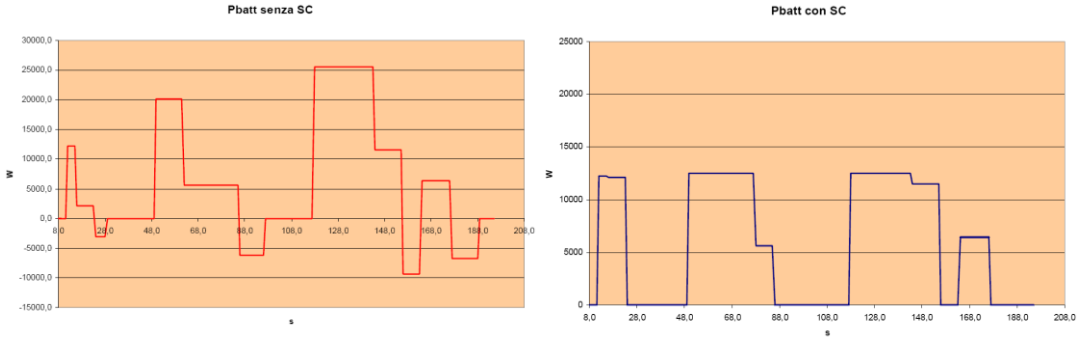


Figura 409. Profilo di prova senza supercondensatori (a sinistra) e con supercondensatori (a destra)

Il test parametrico eseguito prima e dopo l'applicazione dei cicli vita, consiste in classiche prove di capacità ai vari regimi. Si riporta di seguito la sequenza di prova, interamente eseguita a temperatura ambiente, che è stata utilizzata.

Tabella 78. Sequenza di prova

Sezione	Test	Descrizione
Test parametrico (all'inizio e dopo ogni 50 cicli, fino a fine vita)	Scarica a corrente costante	Ciclo standard
		Scarica completa @ C/5 + carica standard
	Scarica a corrente costante	Ciclo standard
		Scarica completa @ C/2 + carica standard
	Scarica a corrente costante	Ciclo standard
		Scarica completa @ 1C + carica standard
	Autoscarica	Ciclo standard
		Scarica completa @ C/3 + carica standard
		Circuito aperto per 48h
		Scarica completa @ C/3 + carica standard
	Resistenza interna e tensione a circuito aperto	Ciclo standard
		Scarica @ 1C per 30 sec.
		Carica @ 1C per 180 sec.
		Scarica @ C/3
		Pausa
		Ripetizione fino a raggiungere la tensione di cut-off
Ciclo vita	Derivato da ECE15	Ripetizione fino ad estrarre l'80% della capacità o a raggiungere la tensione minima operativa
		Carica standard

La sperimentazione è stata eseguita in ENEA, utilizzando le apparecchiature di laboratorio costituite da convertitori AC/DC bidirezionali (ciclatori).

I risultati delle prove vita sono riportati nelle figure seguenti.

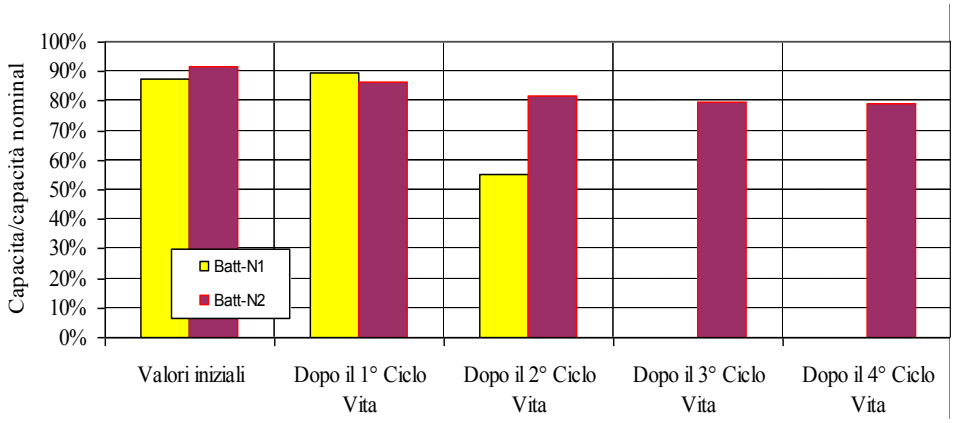


Figura 410. Risultati delle prove vita: variazione della capacità @ C/2

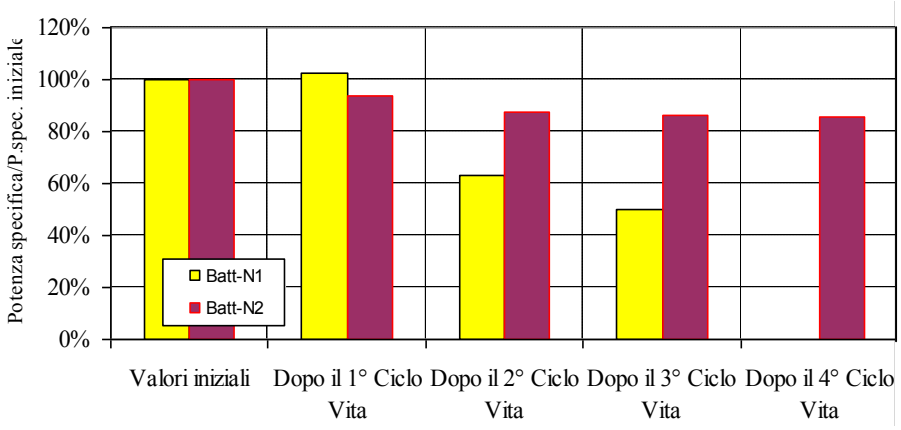


Figura 411. Risultati delle prove vita: variazione della potenza specifica @ C/2

Come si vede, le batterie sottoposte al ciclo di prova che riproduce il funzionamento delle stesse in configurazione "assistita" conservano capacità in Ah e potenza specifica dopo un numero di cicli 4 volte maggiore delle altre, che si degradano molto rapidamente.

Volendo poi esprimere la relazione tra la durata delle batterie e la potenza di picco da esse prelevata si ottiene la funzione:

$$y = 500 \cdot e^{-0,031x}$$

L'analisi dei risultati delle campagne di prova della precedente annualità aveva condotto invece alla funzione

$$y = 50350 \cdot e^{-0,006366x}$$

I risultati della sperimentazione confermano:

- un incremento di durata delle batterie piombo-acido "assistite" dell'ordine di 3÷4 volte, circa uguale a quello verificato in prove precedenti ("Studio di sistemi avanzati di accumulo di energia: progetto e realizzazione di un sistema di accumulo misto batterie-supercondensatori per microcar elettrica " - Report RdS/2011/234);
- l'esistenza di una correlazione di tipo esponenziale tra la potenza di picco prelevata dalle batterie e la durata delle stesse, con coefficienti però diversi da quelli trovati in precedenza.

I risultati della campagna di prove hanno confermato le ipotesi iniziali, ma hanno evidenziato pure la stretta dipendenza dei risultati stessi dalla tipologia delle batterie e dalle specifiche di missione, di conseguenza, i valori numerici e le correlazioni ottenute con le suddette prove, diversi da quelli ottenuti con le prove precedenti, non valgono in generale: è sempre necessario prevedere l'esecuzione di prove vita "di confronto" analoghe a quelle

descritte nel presente elaborato, qualora si voglia quantificare il beneficio derivante dall'applicazione di questa tecnologia a casi specifici.

Le attività A.2 sono illustrate nei dettagli nel rapporto RdS/2012/121.

B. Ricarica rapida e V2G (Vehicle-to-Grid)

Nell'ambito del programma dell'annualità, all'obiettivo B "Ricarica rapida e V2G (Vehicle-to-Grid)", è previsto il benchmark di due soluzioni possibili per la ricarica rapida (1C) di un minibus da 40-50 kW (Figura 412).

Figura 412. Ducato Metropolis Elettrico

Le due soluzioni proposte, entrambe focalizzate sull'interfaccia verso il veicolo, prevedono la prima un caricabatteria a bordo veicolo, alimentato da una colonnina in AC. di potenza adeguata, (Università di Padova), l'altra una stazione di ricarica con convertitore AC/DC. come interfaccia verso la rete ed un secondo convertitore DC/DC che alimenta direttamente le batterie del mezzo (Università dell'Aquila).

Per un confronto tecnico-economico tra le due soluzioni si è scelto un caso concreto, considerando come veicolo un piccolo autobus, e come utenza una linea di trasporto pubblico locale (TPL) sulla circonvallazione della città dell'Aquila.

Nel TPL, infatti, grazie alla recente disponibilità dei sistemi d'accumulo adeguati e di sistemi/tecnologie che consentono ricariche rapide e frequenti, al capolinea o eventualmente anche alle fermate, i veicoli a batteria possono offrire un servizio di 12-16 ore al giorno, senza interruzioni, silenzioso e pulito, a costi molto ridotti rispetto a mezzi progettati e realizzati per la sola ricarica notturna: quest'ultimi, infatti, richiedono l'impiego di batterie 2-3 volte più grandi, e quindi molto più pesanti e costose, per offrire comunque un servizio ridotto (autonomia massima: 150-180 km).

L'esperienza meglio conosciuta a riguardo è quella condotta in California dalla società di trasporto pubblico locale Foothill Transit, con l'utilizzo di tre autobus Ecoliner entrati in servizio nel Settembre 2011, che viaggiano per 16 ore al giorno per 7 giorni a settimana, con una percorrenza giornaliera di 200 km.

Figura 413. Autobus Ecoliner in ricarica

L'autonomia assicurata al mezzo da tale sistema d'accumulo è di circa 50 km, largamente insufficienti per il servizio effettuato se non ci fosse una ricarica rapida fino al 95% ogni 12 km. In questo modo lo stato di carica della batteria non scende mai sotto il 70% del valore nominale, cosa che permette di garantirne una lunga durata. Gli elementi usati per questa batteria sono di tipo LTO, nei quali l'anodo in grafite è sostituito da uno al titanato di litio nanostrutturato, che offre una superficie attiva fino a 100 volte maggiore dell'anodo tradizionale e non reagisce con l'elettrolita: ciò permette di evitare il graduale decadimento delle caratteristiche che affligge invece altri tipi di batterie.

La ricarica della batteria avviene in una stazione automatica equipaggiata con un braccio robotizzato (Figura 413), che provvede ad agganciare appositi contatti di potenza sistemati sul padiglione del bus permettendo di effettuare la ricarica in 10 min. L'opportunità della automazione della fase di ricarica deriva principalmente da considerazioni di esercizio (sicurezza d'uso, personale non qualificato etc.), ma assicura nel contempo uno sfruttamento ottimale del tempo a disposizione, che per le ricariche brevi è limitato a pochi minuti. Lo sviluppo della ricarica "contactless" permetterà di sfruttare ancor meglio i tempi di sosta.

Caricabatterie "integrale"

Nell'ambito della prima linea di attività prevista per l'obiettivo B è stato effettuato uno studio su tutte le tipologie di caricabatterie "a bordo veicolo", seguito dall'esposizione del concetto di "Inverter integrale" e dalla riconfigurazione del convertitore di trazione del Ducato, della potenza di 40-50 kW, per ottenerne un caricabatteria bidirezionale [Report RdS/2012/090].

Lo studio ha preso in esame i caricabatteria stand-alone, sia unidirezionali (nelle due categorie "ad alta frequenza" e PFC, che bidirezionali, sia monofase che trifase, per passare poi alla esposizione dei caricabatteria integrali, dal più semplice (caricabatteria integrali unidirezionali) al più completo (caricabatteria integrali, bidirezionali e trifase).

Il concetto di "caricabatteria integrale" nasce dalla considerazione che i moderni veicoli elettrici a batteria sono alimentati da invertitori trifase che sono sostanzialmente convertitori DC-AC bidirezionali. Il sistema formato dall'invertitore e dal motore costituisce l'azionamento di trazione (Figura 414) dove il motore è rappresentato dalle induttanze di fase ed il punto N è il centro stella del motore, di solito non accessibile.

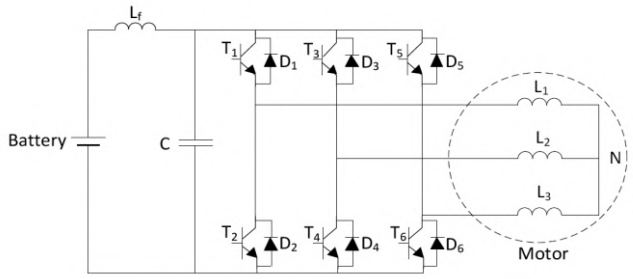


Figura 414. Azionamento trifase di trazione a corrente alternata

I caricabatteria realizzati secondo questo approccio sono chiamati caricabatteria integrali e hanno il merito di ridurre l'elettronica di potenza a bordo mezzo, praticabile dal momento che i sistemi di bordo non funzionano mai contemporaneamente nelle modalità "alimentazione" e "trazione". Oltre ai dispositivi di potenza dell'invertitore, si possono utilizzare anche le induttanze del motore laddove esse siano richieste o per spianare la corrente dell'accumulatore o per disaccoppiare il caricabatteria dalla rete.

La riconfigurazione dell'invertitore di trazione per svolgere la funzione di caricabatteria avviene per mezzo di deviatori e/o interruttori che possono essere di tipo elettromeccanico.

L'accumulatore, e di conseguenza l'invertitore di trazione e il motore, operano in genere a tensioni diverse, spesso minori, della tensione di rete raddrizzata. Inoltre i dispositivi dell'invertitore di trazione sono dimensionati per prefissati valori di corrente efficace e massima. Pertanto, nel riconfigurare l'invertitore di trazione e/o nell'utilizzare le induttanze del motore, è necessario tenere conto dei vincoli imposti dalle caratteristiche elettriche dei componenti a disposizione, principalmente in termini di tensioni e correnti ammissibili. E' peraltro intuibile che, utilizzando al meglio l'invertitore di trazione, la potenza di un caricabatteria integrale è rapportabile alla potenza dell'invertitore. Poiché le potenze di dimensionamento degli invertitori di trazione sono generalmente molto maggiori delle potenze dei caricabatteria attualmente installati a bordo, ne deriva che i caricabatteria integrali sono in grado di caricare gli accumulatori con potenze elevate, che possono quindi raggiungere i valori elevati richiesti per eseguirne la carica rapida.

I caricabatteria integrali possono essere monofasi o trifasi, e per ognuna di queste connessioni, il flusso di potenza può essere unidirezionale o bidirezionale.

Il progetto di massima del caricabatteria integrale per il caso del Ducato è stato condotto in condizioni nominali di tensione dell'accumulatore. In accordo con le specifiche dell'accumulatore, la potenza assorbita dallo stesso, calcolata come prodotto della tensione nominale d ($V_{B,N}$=263 V) per la corrente massima di carica ($I_{B,car,max}$=120 A), vale 32 kW. In condizioni nominali di tensione dell'accumulatore, il valore efficace massimo della componente fondamentale della tensione di fase all'ingresso del raddrizzatore attivo in zona lineare di modulazione vale 107 V.

Indicando con $\overline{V}_g$, $\overline{V}_{c,1}$ e $\overline{I}_c$ i fasori rispettivamente della tensione di rete, della componente fondamentale della tensione all'ingresso del convertitore AC-DC e della corrente assorbita dal caricabatteria, il secondo principio di Kirchoff applicato alla maglia di ingresso dello schema di Figura 415, porta alla seguente relazione:

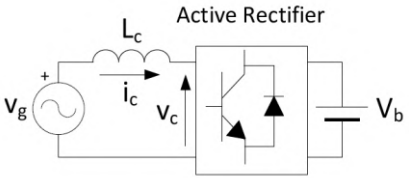


Figura 415. Schema di principio di un caricabatteria bidirezionale monofase

$$\overline{V}_{c,1} = \overline{V}_g - j\omega L_c \overline{I}_c$$

nella quale si è trascurata la caduta di tensione sulla resistenza parassita dell'induttore.

Affinché il caricabatteria integrale sia capace di controllare la corrente che assorbe da rete è necessario che l'ampiezza della componente fondamentale della tensione all'ingresso del caricabatteria sia maggiore dell'ampiezza della tensione di fase di rete, in accordo con la relazione:

$$V_{c,1} = \sqrt{V_g^2 + (\omega L_c I_c)^2}$$

Nel nostro caso la tensione di fase richiesta per l'alimentazione del caricabatteria (93 V) è minore della tensione di fase (230 V) di una rete trifase da 400 V e pertanto il caricabatteria dovrà essere preceduto da un trasformatore d'ingresso (trifase) che abbassi la tensione di fase a 93 V, oppure seguito da un convertitore DC-DC in cascata abbassatore.

Il valore degli induttori di disaccoppiamento è stato scelto in modo di rispettare la normativa riguardante l'iniezione di armoniche di corrente in rete (EN 61000-3-12). Per realizzare gli induttori di disaccoppiamento si può anche valutare la convenienza di utilizzare le induttanze del motore (nel caso di motore asincrono le induttanze in oggetto sono quelle di dispersione totale) oppure di costruirli ad hoc. È necessario che le induttanze del motore soddisfino quanto sopra enunciato, ma questa scelta dipende anche da altri fattori come l'accessibilità del centro stella del motore, la necessità di introdurre un apparato di blocco del rotore[30], ecc..

Dallo studio dell'Università di Padova emerge come i caricabatteria integrali siano una soluzione molto promettente per la riduzione del peso, ingombro e costo dei convertitori statici installati a bordo dei veicoli elettrici plug-in senza che questo vada a scapito delle prestazioni. Anzi, i caricabatteria integrali possono fornire prestazioni di ricarica superiori a quelle offerte dei caricabatteria oggi utilizzati dal momento che sono derivati da un convertitore che, essendo costruito per alimentare il motore di trazione, è in grado di gestire potenze elevate; sotto questo aspetto i caricabatteria integrali si prestano a realizzare la carica rapida degli accumulatori di trazione. Inoltre, essi hanno il merito di essere un carico con fattore di potenza unitario e di poter svolgere i servizi V2G. L'analisi del funzionamento dei caricabatteria integrali, in particolare di quelli con topologia bidirezionale trifase, ha mostrato che il requisito fondamentale per il loro corretto impiego è relativo al valore di tensione nel lato in continua, che deve essere maggiore dell'ampiezza della tensione concatenata nel lato in alternata in ogni condizione di funzionamento. Pertanto, se la tensione dell'accumulatore di trazione è inferiore al citato valore, è necessario adattare o la tensione di rete o quella dell'accumulatore, nel primo caso inserendo un trasformatore abbassatore tra il caricabatteria e la rete, nel secondo caso inserendo un convertitore DC-DC abbassatore tra il caricabatteria e l'accumulatore. Nell'ipotesi di progettare ex-novo il powertrain di un veicolo elettrico plug-in si potrebbe quindi pensare di scegliere un accumulatore con un valore di tensione che soddisfi alla condizione sopra menzionata in modo che il caricabatteria integrale possa funzionare senza l'aggiunta di ulteriori dispositivi.

Ricarica in corrente continua con accumulo stazionario

Nell'ambito della seconda linea di attività si è effettuato un dimensionamento di massima per una "Stazione di servizio per veicoli elettrici", il cui studio, per quanto attiene l'accumulo stazionario ed il convertitore AC /DC. lato rete, è partito dalle risultanze di altre attività condotte in ambito "Ricerca di Sistema" (Progetti 1.2 "Accumulo elettrico e 3.1 "Smart Grid").

Nell'ambito del progetto 3.5 "Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" è stato quindi studiato il convertitore DC/DC bidirezionale, che completa lo schema della stazione di servizio (Figura 416).

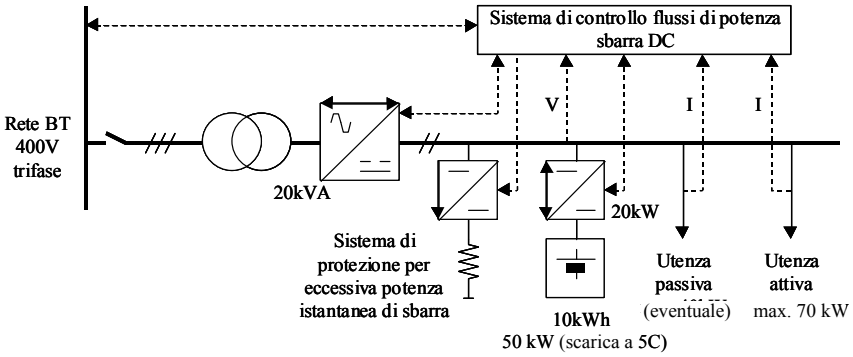


Figura 416. Stazione di servizio con accumulo elettrico e convertitore bidirezionale

[30] Che altrimenti entrerebbe in rotazione

Una prima conversione AC/DC è effettuata con un convertitore in grado di assorbire potenza dalla rete con fattore di potenza prossimo all'unità e controllato in modo da ottenere una tensione di uscita costante. La seconda conversione è effettuata con un convertitore DC/DC con tensione di ingresso costante, controllato in modo da effettuare la carica delle batterie al livello di tensione più idoneo per le batterie stesse.

In generale, l'utilizzo di un sistema di carica fisso permette di contenere il peso del veicolo stesso e di aumentare l'efficienza della conversione dell'energia. È, infatti, più economico e più semplice, da un punto di vista tecnologico, ottenere elevati rendimenti con convertitori fissi rispetto a quelli di bordo che devono necessariamente rispettare rigorosi vincoli di peso e di ingombro.

Lo studio del sistema di trasporto (veicoli ed infrastrutture, materiali ed immateriali) ha comportato la definizione della missione, la verifica della compatibilità della stessa con l'andamento dello stato di carica della batteria installata sul veicolo prescelto e la verifica, in energia ed in potenza, del dimensionamento preliminare dell'accumulo elettrico stazionario. I dati caratteristici della missione sono riportati in Tabella 79.

Tabella 79. Dati caratteristici della missione

Lunghezza percorso, km	4
Velocità media (ECE 32), km/h	16
N. fermate (compreso il capolinea)	15
Durata sosta al capolinea, min	5
Durata netta ricarica breve, min	3
Durata totale di ciclo, min	20
Percorrenza totale giornaliera, km	185

Si ipotizza che il servizio venga effettuato con due coppie di mezzi; con una velocità media di 16 km/h, 4 autobus assicurano un passaggio ogni 10'. Abbiamo quindi n. 4 autobus elettrici in esercizio (+ 1 in riserva) per 16 ore al giorno

Assumendo per il nostro veicolo il consumo specifico dichiarato dal costruttore (370 Wh/km), che corrisponde a quanto misurato sul campo nelle prove effettuate in Casaccia nella scorsa annualità su di un mezzo simile, un Tecnobus Pollicino, l'andamento del contenuto energetico della batteria del mezzo, durante il turno di 7,5 ore, è rappresentato in Figura 417.

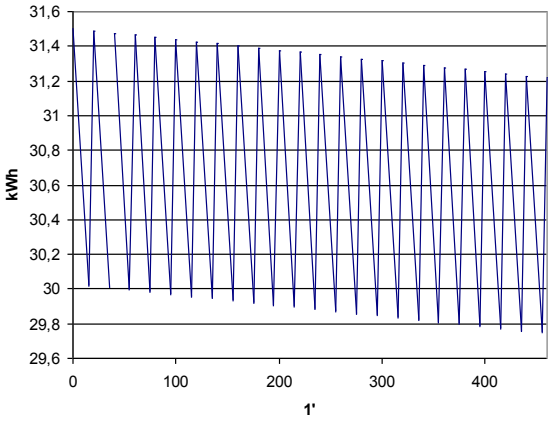


Figura 417. Andamento del livello energetico in batteria

Nelle condizioni di progetto, quindi, l'autobus non avrebbe bisogno di una ricarica intermedia (la ricarica al capolinea compensa quasi esattamente i consumi) e viaggerebbe con batterie quasi completamente cariche.

La simulazione dell'esercizio della stazione, estesa ad 1 ora, è compendiata nel diagramma di Figura 418, che ha consentito la verifica, positiva, delle specifiche preliminari della stazione di ricarica.

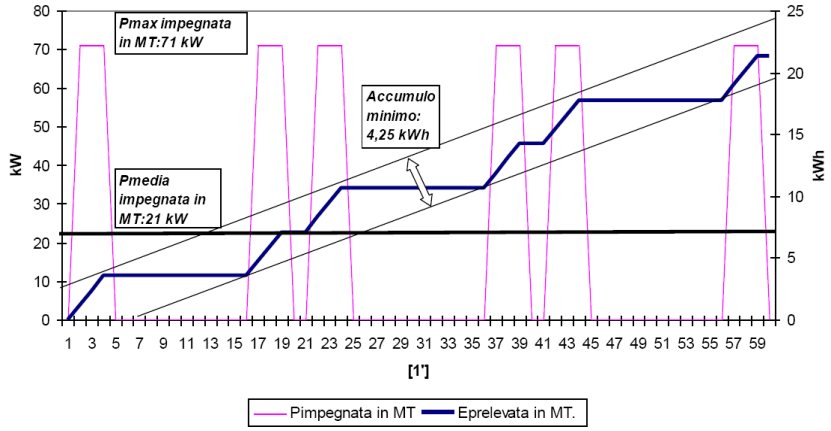


Figura 418. Andamento nel tempo delle potenze impegnate e dell'energia prelevata

La capacità energetica richiesta all'accumulo elettrico è infatti minore di 10 kWh, mentre la potenza richiesta (50 kW), è compatibile con la corrente di scarica massima di una batteria Li-Ione "di potenza" da almeno 10 kWh ($I_{max.}$= 5 C, corrispondente ad una scarica completa in 1/5 di un'ora).

Sono però necessari ventilatori per la gestione termica del sistema, come verificato sperimentalmente nel corso delle prove eseguite sull'impianto della funicolare di Bergamo, realizzato gli anni scorsi sempre in ambito RdS. Lo studio del convertitore DC/DC che completa la stazione di ricarica è inquadrato in uno studio più generale delle diverse tipologie di caricabatterie "a terra"; anche in questo caso lo studio ha preso in esame i convertitori di potenza DC/DC stand-alone, sia unidirezionali (nelle due categorie "isolato" e "non isolato"), che bidirezionali, "isolati" e "non isolati".
Nel nostro caso, a questi livelli di tensione (600 V) della barra in DC., sembrerebbe necessario impiegare convertitori isolati, anche se a tale proposito la normativa, imponendo in realtà un limite alla tensione di passo e di contatto, potrebbe lasciar spazio ad altre soluzioni.

L'isolamento tra ingresso e uscita comporta necessariamente l'impiego di un accoppiamento magnetico, ovvero un trasformatore, dimensionato per la massima potenza che il convertitore deve gestire. Tale trasformatore, per ovvi motivi di ingombro e peso, deve funzionare a frequenze molto più elevate di quella industriale. La tensione di alimentazione del trasformatore ad alta frequenza è ottenuta tramite un convertitore DC/AC. Data la natura dei convertitori in oggetto, a valle del trasformatore deve esserci uno stadio AC/DC ad alta frequenza.

Tali convertitori pertanto, da un punto di vista funzionale, devono necessariamente essere costituiti dai seguenti stadi (Figura 419):

- convertitore DC/AC ad alta frequenza;
- trasformatore ad alta frequenza;
- raddrizzatore ad alta frequenza.

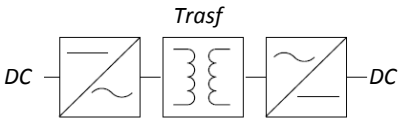


Figura 419. Schema di principio di un convertitore DC/DC isolato.

Data l'elevata potenza da gestire è stata scelta la configurazione Full-Bridge isolata, essendo quella che permette un più efficiente sfruttamento dei semiconduttori, del materiale magnetico del trasformatore e uno stress relativamente limitato dei semiconduttori.

Un limite alquanto restrittivo alla scelta di una delle molte soluzioni, anche tra loro relativamente differenti, si è rivelato essere quello della frequenza di commutazione dei dispositivi, tenuta relativamente bassa per rispettare le limitate capacità di calcolo del microcontrollore a disposizione per il controllo del convertitore.

La frequenza scelta, 10 kHz, ha reso praticamente superflua l'adozione di tecniche particolari di commutazione dei dispositivi a semiconduttore, quali quelle che implicano una risonanza o una quasi-risonanza. A basse frequenze di

commutazione, infatti, i vantaggi apportati da tecniche più sofisticate sarebbero decisamente limitati, a fronte di una maggiore complicazione circuitale, dell'introduzione di ulteriori fonti di perdite e della possibilità di introdurre instabilità e difficoltà di controllo.

Poiché con frequenze di commutazione di qualche decina chilohertz è difficilmente raggiungibile il livello di potenza richiesto a causa della limitata potenza gestibile con i nuclei magnetici disponibili in commercio si è deciso di utilizzare più convertitori (n. 4) di potenza minore in parallelo, ognuno dei quali prevede il circuito del ponte ad H, un trasformatore con nucleo in ferrite e avvolgimento secondario a presa centrale (Figura 420).

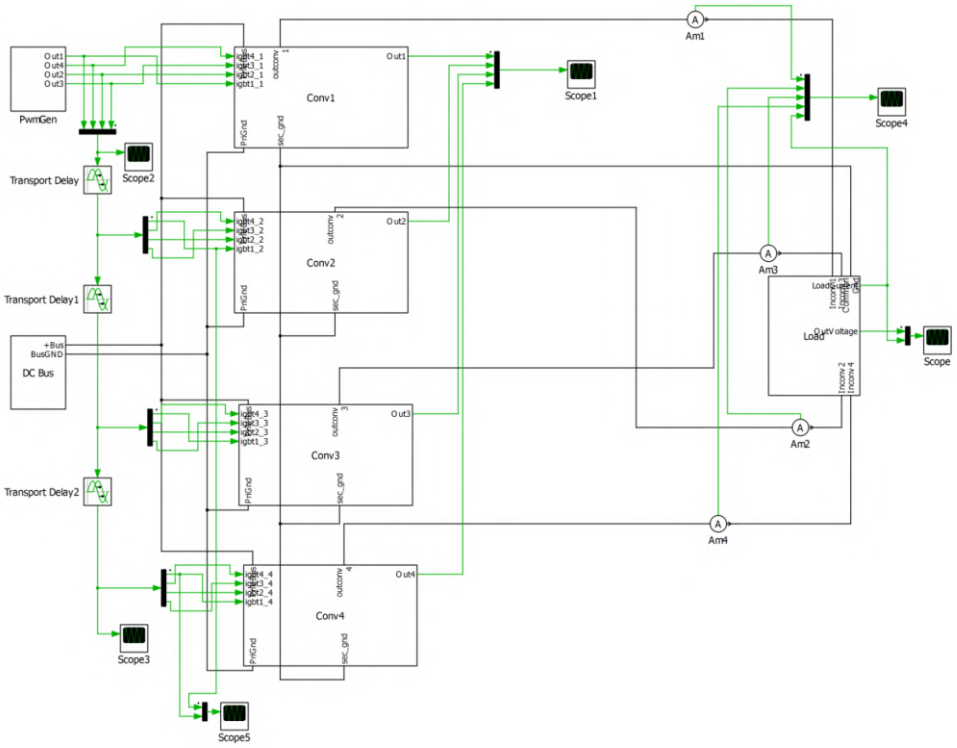


Figura 420. Schema di macchina

L'utilizzo di più convertitori permette non solo di ridurre la loro potenza a circa un quarto dell'intera potenza richiesta dal pacco batterie, ma anche di adottare la tecnica dell'interlacciamento (interleaving) in modo tale da avere un ripple di tensione in uscita di frequenza pari a 80 kHz, otto volte più elevata di quella di commutazione (ogni convertitore, essendo di tipo simmetrico, genera due semionde nel periodo *T*).

Tale tecnica, oltre ad ampliare di molto la scelta dei dispositivi a semiconduttore, a fronte di una complicazione circuitale e di controllo, permette un abbattimento del ripple di tensione e corrente sul carico; senza ricorrere a questa tecnica, inoltre, dimensioni e costi dei dispositivi di filtraggio sarebbero di gran lunga superiori.

Il trasformatore scelto è di tipo planare, con avvolgimenti in rame laminare e nucleo in ferrite, che permette di limitare fortemente il fenomeno dell'effetto pelle, diminuendo dimensioni e peso sia del materiale magnetico sia del rame.

L'uso del trasformatore ha anche il fine di assicurare l'isolamento galvanico tra il bus dell'alimentazione e la linea di alimentazione della batteria; tale accorgimento è stato dettato dalla necessità di fornire sicurezza elettrica intrinseca in caso di guasto e per evitare che la tensione del bus in continua (600 V) possa interessare il veicolo.

Al secondario del trasformatore è presente infine un raddrizzatore a due diodi che fornisce tensione raddrizzata a un filtro composto da un induttore e da un condensatore.

Come dispositivi di commutazione sono stati scelti gli IGBT in quanto permettono una elevata velocità di commutazione, paragonabile a quella dei MosFET di potenza, pur avendo una maggior attitudine a regolare il flusso di correnti di grande entità ed elevate tensioni, controllati con un duty-cycle massimo di 0,45 che, alla frequenza di 10 kHz, permette un tempo di guardia di almeno 5 μs, ampiamente sufficiente per l'esaurimento completo della coda di corrente tipica degli switch adottati, in questo caso degli IGBT.

Dalla simulazione dell'impianto, nel caso più sfavorevole per quanto riguarda il ripple delle grandezze di uscita, cioè alla minima tensione di batteria, si può valutare l'efficacia della tecnica dell'interleaving. Nella Figura 421

sono riportate le correnti di uscita dei singoli convertitori e quella sul carico; a regime permanente il valore del ripple della corrente di carico è in pratica trascurabile nonostante quello delle correnti dei singoli convertitori sia di circa 40 A picco-picco. Tale effetto dipende ovviamente anche dalla presenza del condensatore di uscita, tuttavia, se i convertitori fossero tra loro sincroni, si avrebbe un ripple di corrente quattro volte più elevato a una frequenza quattro volte più bassa e, a parità di filtro *LC* (100 μH e 10 μF), il ripple di corrente sul carico sarebbe molto più elevato.

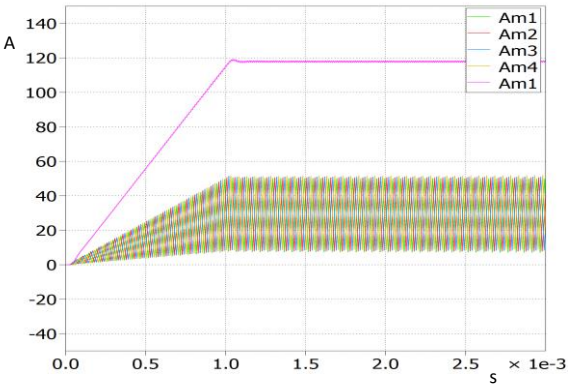


Figura 421. Corrente sul carico In viola e correnti in uscita da ogni convertitore negli altri colori

Stazione di rifornimento elettrica e conclusioni

La configurazione della "Stazione di rifornimento elettrica" con conversione a bordo veicolo è riportata in Figura 422, mentre in Figura 423 e Figura 424 sono riportate due diverse configurazioni con conversione finale a terra [Report RdS/2012/092]. Infatti si è considerato, per completezza di esposizione, anche una alternativa commerciale costituita dall'utilizzo di colonnine di ricarica in DC CHAdeMO in aggiunta alla soluzione precedentemente illustrata (doppia conversione ed accumulo elettrico intermedio).

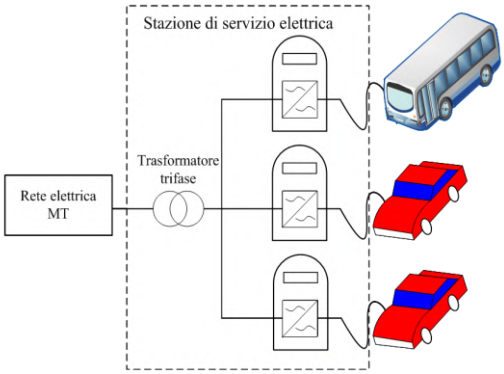


Figura 422. Soluzione n.1: stazione di servizio elettrica con caricabatteria "integrale"

Sono stati previsti n.3 punti di ricarica, per prevedere la presenza contemporanea di n. 3 mezzi (circolare dx + circolare sx + autobus di riserva).

Data la potenza, 100-150 kW, e la variabilità del carico, l'impianto deve essere alimentato in ogni caso in MT tramite un trasformatore.

La potenza media richiesta sulle 16 ore al trasformatore trifase è di poco più di 20 kW, ma la potenza massima di picco supera i 100 kW, considerando un massimo di 3 autobus in ricarica contemporaneamente (circolare dx + circolare sx + autobus di riserva), anche se per qualche minuto). La potenza di picco del trasformatore trifase richiesta da n. 3 colonnine in AC da 43 kW ENEL (soluzione n.1) o n.3 colonnine in DC, ad esempio le ABB Terra 51, (soluzione n.2), varia in effetti da 130 a 150 kW.

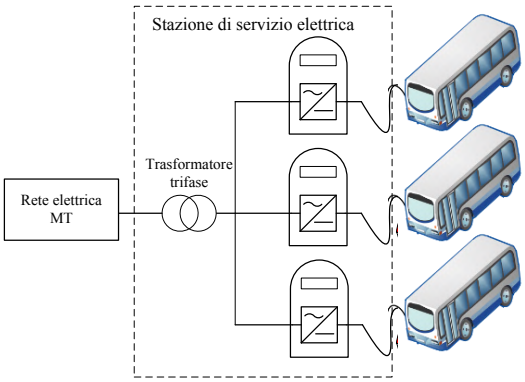


Figura 423. Soluzione n.2: convertitori AC/DC nelle colonnine di carica (CHAdeMO)

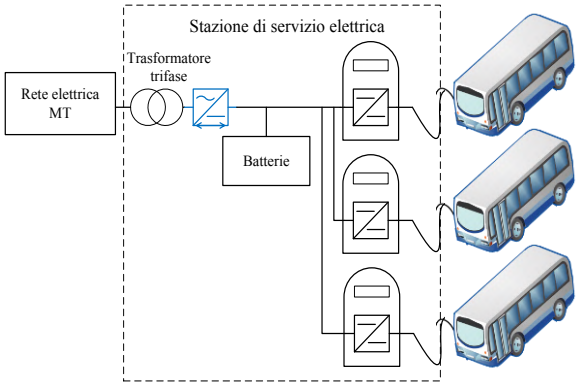


Figura 424. Soluzione n.3: stazione di servizio con accumulo e convertitore bidirezionale

In ogni caso è necessario prevedere il transito tra veicolo e stazione non solo di energia elettrica, ma anche di informazioni che consentano una corretta contabilizzazione dell'energia fornita e, nel caso della conversione a terra, anche l'uso delle tecniche di ricarica più adatte alla batteria presente a bordo, nonché altre funzioni, quali ad esempio il monitoraggio dello stato delle principali parti del veicolo finalizzato alla diagnostica statistica e predittiva etc..

La soluzione n.3 (Figura 424) risolve i problemi legati alla elevata variabilità del carico tramite una batteria stazionaria. In tal caso è possibile caricare le batterie dei veicoli utilizzando contemporaneamente la rete elettrica e le batterie fisse o esclusivamente quest'ultime, eventualmente a potenza ridotta e per un arco temporale limitato nel corso della giornata, nel caso di mancanza temporanea della rete.

Il vantaggio che si ottiene con tale sistema, oltre a quello legato alla continuità del servizio, riguarda principalmente la rete. Il sistema di accumulo dell'energia permette, infatti, di limitare notevolmente la potenza di corto circuito della rete nel punto di consegna, con un vantaggio economico da parte del gestore della rete stessa..

Non è possibile in questa sede un'analisi approfondita degli aspetti economici delle tre soluzioni proposte, soprattutto per gli aspetti sistemici del problema (servizio verso la rete etc.). Alcuni elementi di valutazione delle tre diverse soluzioni sono riportati di seguito:

	Soluzione n.1	**Soluzione n.2**	**Soluzione n.3**
Costo stimato	n. 3 colonnine da 43 kW in AC. (5.000 € cad., compreso trasformatore abbass.) + trasformatore MT (5000 €[31])	60.000 € (n.3 colonnine da 50 kW) + trasformatore MT (5000 €)	30.000 € (stazione da 40 kVA con accumulo da 10 kWh e trasformatore MT) + costo n.3 convertitori DC./DC (minimo 12.000 €)
Pro	Integrazione componenti	Disponibilità sul mercato immediata	Possibilità di utilizzo accumulo stazionario
Contro	Accesso a logiche inverter	Comunicazione bordo/terra	Comunicazione bordo/terra

In aggiunta ai vantaggi illustrati, raggiungibili in tempi relativamente brevi, per la soluzione n.3 è possibile prevederne un altro se, come è opinione comune, nel futuro si passerà da un sistema centralizzato a un sistema distribuito di produzione dell'energia elettrica, con microproduzione da fonti rinnovabili. In tal caso il sistema di accumulo della stazione di servizio elettrica può essere parte integrante e fondamentale di reti di piccola potenza; esso può funzionare da collettore locale di energia elettrica nelle ore in cui la produzione sia in esubero rispetto ai carichi, per poi metterla a disposizione per coprire i picchi di carico. Ciò permetterebbe inoltre di ridurre la distanza di trasmissione dell'energia elettrica e le relative perdite negli elettrodotti.

In conclusione si evidenzia come tanto i caricabatteria integrali che le soluzioni "tutto a terra" analizzate sono valide alternative per la carica rapida di veicoli elettrici per il TPL.

[31] Trasformatore in olio 160 kVA 20000 / 400 V

Le diverse soluzioni si differenziano notevolmente in termini di costo e difficoltà implementative, per cui la scelta del tipo di impianto non può prescindere da un'analisi costi-benefici, in modo particolare per quanto riguarda la presenza di un sistema di accumulo di energia nell'impianto fisso e la sua capacità.

Anche l'evoluzione della normativa tecnica, andando di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie, costituirà elemento dirimente per la scelta della soluzione più adatta allo specifico caso.

Nel caso del trasporto privato, naturalmente, pur rimanendo valide buona parte delle considerazioni sopra esposte, potrebbero aggiungersene altre legate agli aspetti commerciali, alla facilità di adattamento a mezzi di caratteristiche diverse, alla minore prevedibilità del servizio, alle maggiori difficoltà di gestione dei servizi verso la rete etc..

C. Life-Cycle Assessment energetico ambientale e Risk Assessment delle tecnologie suddette

L'obiettivo si suddivide in due attività principali: il Life Cycle Assessment di alcuni dei componenti sviluppati per sistemi di auto elettriche e per componenti per l'alleggerimento strutturale, ed il Risk Assessment relativamente agli accumulatori al litio.

C.1 Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche

Le attività svolte dal Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo [Report RdS/2012/093] hanno riguardato:

- un confronto delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione esaminata con quelle di altre batterie agli ioni di litio, i cui dati sono stati reperiti dall'analisi dello stato dell'arte internazionale effettuata nel primo anno di attività;
- un'analisi di sensibilità dei risultati della LCA svolta nel primo anno di attività. In particolare tale analisi ha permesso di valutare in che modo i risultati subiscono delle variazioni cambiando le ipotesi iniziali riguardanti i dati sulla fase d'uso, e di ottenere informazioni attendibili e rappresentative sull'eco-profilo della batteria Li-Ione in esame;
- la definizione dei criteri di eco-design da applicare nella progettazione e realizzazione delle batterie Li-Ione".

Un'attenta analisi dei risultati ottenuti nell'annualità precedente ha consentito di individuare i materiali e i componenti della batteria responsabili dei maggiori impatti energetico – ambientali. Sulla base di un'analisi degli studi di letteratura riguardanti le batterie agli ioni di litio sono stati definiti degli indirizzi di progettazione eco-compatibile, individuando dei materiali alternativi da impiegare per la produzione della batteria, caratterizzati da minori impatti energetico – ambientali rispetto a quelli attualmente impiegati.

Analisi comparativa delle prestazioni energetico – ambientali della batteria Li-ione esaminata con quelle di altre batterie

L'attività svolta ha riguardato la comparazione delle prestazioni energetico - ambientali della batteria Li-ione, stimate nella precedente annualità, con quelle di altre batterie Li-ione, i cui dati sono stati reperiti da studi di letteratura esaminati in precedenza. Tali studi sono stati sintetizzati, nel primo anno di attività, in schede riassuntive, in ciascuna delle quali sono presenti, qualora disponibili, informazioni relative a: tipologia di prodotto; autori e riferimenti bibliografici; caratteristiche del prodotto; metadati (unità funzionali-UF, confini del sistema, regole di cut-off, regole di allocazione, qualità dei dati); analisi di inventario; impatti energetici ed ambientali.

Nella presente annualità è stata svolta un'analisi dettagliata degli studi di letteratura riportati nelle schede, che ha permesso di selezionare quelli che, sulla base dell'UF scelta, dei confini del sistema e degli indicatori di impatto energetico-ambientale stimati, potevano essere comparati con il caso studio della batteria al Li-ione in esame.

In dettaglio, dall'analisi dei dati di letteratura si sono riscontrati:

- scarsa trasparenza nell'indicazione delle ipotesi iniziali e delle modalità di raccolta dei dati di campo;
- carenza di informazioni dettagliate sui confini del sistema, sulle regole di cut-off e di allocazione e sulle scelte ed assunzioni fatte per eseguire gli studi, con particolare riferimento alle ipotesi fatte per l'analisi della fase d'uso delle batterie;
- scarso dettaglio nella descrizione delle batterie e delle loro caratteristiche tecniche;
- scarsa presenza dei riferimenti bibliografici relativi ai dati secondari impiegati; presentazione dei risultati in modo aggregato o normalizzato secondo criteri differenti (ad esempio utilizzando gli eco-indicatori);
- sostanziale assenza di metadati ovvero informazioni aggiuntive sulla qualità dei dati;

- uso di differenti indicatori di impatto scelti per descrivere le prestazioni energetico - ambientali delle batterie e, per uno stesso indicatore, uso di differenti unità di misura non comparabili.

Analisi di sensibilità dei risultati della LCA

L'attività svolta ha riguardato una dettagliata analisi di sensibilità sui risultati della LCA svolta nell'ambito del PAR 2008-09. In particolare, sulla base di dati sperimentali forniti dall'ENEA relativi alla fase d'uso, riguardanti l'energia immagazzinata dalla batteria in fase di carica e l'energia fornita dalla batteria in fase di scarica, è stato stimato il consumo di energia della batteria e del BMS durante la vita utile della batteria, ipotizzata pari a 12.000 ore, considerando 6.000 cicli di carica e 6.000 cicli di scarica della durata di 3 ore ciascuno.

Inoltre, al fine di valutare la variazione dei risultati in funzione delle modalità di produzione dell'energia elettrica, sono stati esaminati quattro scenari di produzione: produzione con mix energetico italiano, produzione con mix energetico europeo, produzione con pannelli fotovoltaici e produzione con turbine eoliche.

Dall'analisi di sensibilità effettuata è stato possibile stimare i range di variazione entro cui si collocano gli indicatori di impatto energetico - ambientale.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che la fase del ciclo di vita della batteria caratterizzata dai maggiori impatti energetico - ambientali è quella di produzione, mentre risulta poco significativo l'impatto imputabile alla fase di fine vita.

In dettaglio, con riferimento al consumo di energia primaria totale per i quattro scenari esaminati, la fase di produzione ha un'incidenza variabile dal 74 al 98% per le batterie del tipo 30 Ah, dal 38 all'86% per le batterie del tipo 60 Ah e dal 43 al 90% per le batterie del tipo 100 Ah.

Esaminando in dettaglio la fase d'uso e con riferimento ai quattro scenari di produzione dell'energia elettrica, l'impatto minore è indotto con la produzione di energia elettrica con turbine eoliche.

Considerando come unità funzionale 1 kWh di energia prodotta dalla batteria, il confronto tra le differenti tipologie di batterie (30, 60 e 100 Ah) ha evidenziato che nella maggior parte dei casi gli impatti medi decrescono all'aumentare della dimensione della batteria.

Definizione di criteri di eco-design da applicare nella progettazione e realizzazione delle batterie Li-ione

L'attività svolta ha riguardato una dettagliata analisi dei componenti/materiali della batteria e della cella che sono caratterizzati dai maggiori impatti energetico - ambientali, al fine di definire dei criteri di progettazione eco-compatibile.

Sulla base di un'analisi degli studi di letteratura riguardanti le batterie agli ioni di litio sono stati individuati dei materiali da impiegare per la realizzazione della batteria, caratterizzati da minori impatti energetico – ambientali rispetto a quelli attualmente impiegati.

In dettaglio, sono stati individuati dei possibili sostituti dell'acciaio inox nel box batteria, tra cui: acciaio inox prodotto con convertitore; acciaio bassolegato prodotto con convertitore; acciaio non legato prodotto con convertitore; acciaio inox prodotto con forno ad arco elettrico; acciaio bassolegato e non legato prodotto con convertitore; acciaio bassolegato, mix di produzione con convertitore e con forno ad arco elettrico; acciaio non legato, mix di produzione con convertitore e con forno ad arco elettrico; lega di alluminio "cast alloy", mix di produzione da materie prime vergini e da scarti di alluminio; alluminio riciclato prodotto da scarti non sottoposti ad alcun trattamento; alluminio riciclato prodotto da scarti sottoposti a trattamento; polipropilene.

Un'analisi degli impatti energetico – ambientali dei materiali sopra elencati, da impiegare in alternativa all'acciaio inox, ha evidenziato che per ciascuna batteria non vi è un vantaggio energetico – ambientale connesso all'uso di alluminio prodotto da materie prime vergini, alluminio prodotto da un mix di materie prime vergini e da scarti, lega di alluminio "wrought alloy" prodotto da un mix di materie prime vergini e da scarti. Si è inoltre evidenziato che l'utilizzo delle altre tipologie di materiali potrebbe determinare una riduzione degli impatti energetico – ambientali del box batteria.

Si sottolinea che il possibile utilizzo dei suddetti materiali va valutato tenendo conto non solo dei vantaggi ambientali connessi alla loro attuazione, ma anche dei costi economici da sostenere e della variazione delle caratteristiche di affidabilità e funzionalità del prodotto.

C.2 Life Cycle Assessment dei materiali strutturali

L'analisi del Life Cycle Assessment dei materiali strutturali presenta uno studio relativo alle applicazioni dell'Aluminum Foam Sandwich (AFS) nei mezzi di trasporto, in particolare nell'ambito di pavimenti flottanti per vagoni ferroviari [Report RdS/2012/094].

La prima fase della ricerca ha riguardato una rassegna bibliografica degli studi relativi ad applicazioni similari, propedeutica all'esecuzione di uno studio di LCA del componente in fase di sviluppo da parte del progetto. Questo studio ha consentito, anche con i limiti derivanti dalla qualità dei dati disponibili dato l'attuale sviluppo della tecnologia AFS, di valutare l'esistenza di trade off tra i diversi elementi che compongono l'AFS e tra i diversi impatti, nonché di identificare i processi più critici dal punto di vista ambientale. Lo studio di LCA ha permesso anche di svolgere delle analisi di ecodesign proponendo l'utilizzo di materie prime alternative come l'uso di allumino riciclato, o valutando gli effetti di una riduzione della distanza di approvvigionamento della materia prima. Inoltre è stata effettuata un'analisi parametrica variando la geometria del pannello per fornire al progettista dati per ottimizzare dal punto di vista ambientale il rapporto tra spessore della pelle in allumino del sandwich e del suo interno in schiuma (cuore).

L'analisi di LCA riguarda la fase di produzione dei materiali in AFS, utilizzabili per vettori di trasporto pubblico a basso impatto ambientale e maggiore sicurezza passiva. Lo studio prevede un'analisi completa della produzione del materiale AFS da punto di vista ambientale per proporre proposte di miglioramento ambientale alla progettazione del materiale stesso e suggerimenti di approfondimento e analisi per l'eventuale progettazione di un pavimento flottante in AFS dei vagoni passeggeri per treni di media e lunga percorrenza. Esso è stato definito nel corso del progetto come il componente su cui incentrare l'analisi di progettazione per l'applicazione di questo materiale innovativo al settore del trasporto pubblico.

L'obiettivo dello studio è studiare il pannello in AFS 40x30x3 cm^3 prodotto in laboratorio. Si è assunto di considerare tale pannello poiché è la massima geometria producibile in ENEA che meglio approssima la forma del materiale da usare per progettazione del pavimento in AFS come proposto a CALEF che si occuperà della progettazione di tale pavimento. I confini del sistema in questa analisi si estendono dalla culla al cancello, infatti si analizzano tutti i processi dalla produzione delle materie prime fino alla produzione del pannello senza considerane l'uso e il fine vita poiché il pavimento flottante è ancora in fase di progettazione. Sono compresi all'interno dei confini del sistema tutti i processi relativi alla produzione del pannello in AFS 40x30x3 cm^3, che rappresenta il flusso di riferimento dello stesso, come si vede in figura 30.

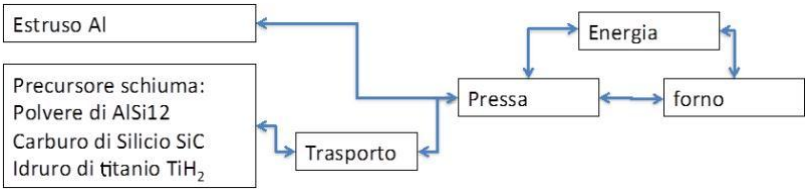


Figura 425. Confine del sistema produzione pannello

Come software per l'analisi LCA è stato utilizzato il Gabi4.4 e per l'analisi degli impatti è stato scelto il metodo IMPACT 2002 + (Joillet et al, 2008) a disposizione sul Gabi.

L'analisi d'inventario è stata eseguita raccogliendo dati primari, dati secondari e dati terziari. I dati primari sono quelli raccolti presso il laboratorio ENEA di UTT- MAT per quanto riguarda la produzione delle schiume di alluminio e per la produzione di un campione di AFS di dimensioni 40x3x3 cm^3, da questi dati primari, in collaborazione con i tecnici del laboratorio, sono stati stimati i dati per la produzione del pannello in AFS 40*30*3cm^3 . Per la raccolta dati sulla produzione di polveri di AlSi12 sono state contattate attraverso mail con questionari e contatti telefonici diverse aziende produttrici dalle quali si sono ottenute informazioni utili ma scarsi dati quantitativi.

Dati di letteratura sono stati utilizzati quindi sia per la produzione di polveri atomizzate di alluminio, sia per la produzione di idruro di titanio. Invece i dati sulla produzione del profilato di allumino, la produzione del SiC e dei trasporti sono stati ricavati dal database di ecoinvent presente nel software Gabi4.4. Infine i dati per tutti i processi produttivi dei materiali ad accezione dell'AFS sono relativi ai database del Gabi4, SimaPro 7 ed Ecoinvent.

I dati utilizzati nello studio riguardo al pannello sono volume 3600 cm^3, peso totale 2961 g, densità 0,8 g/cm^3, materie prime (polvere di alluminio 1588 g, profilato in alluminio 1296 g, SiC 19 g, idruro di titanio 13 g), energia elettrica 3,525 kWh e trasporti 1,82 tkm.

In Tabella 80 è riportata l'analisi di caratterizzazione, degli impatti potenziali della produzione del pannello di AFS di dimensioni 40x30x3 cm^3 e il contributo di ciascun elemento considerato all'impatto totale. La tabella mostra che in tutte le categorie d'impatto le componenti che hanno un impatto potenziale maggiore sono quelle di produzione della polvere di alluminio e del profilato di alluminio. Questo è dovuto al fatto che in entrambi i processi viene usato l'alluminio primario che ha degli impatti potenziali di produzione molto elevati. Essi sono dovuti sia all'elevato consumo energetico per la produzioni di alluminio dalla bauxite, sia per l'elevato contenuto di emissioni di metalli pesanti in aria e acqua.

Tabella 80. Impatti di caratterizzazione della produzione del campione40x30x3 cm^3

Categoria di impatto	Unità di misura	Impatti tot PannelloAFS 40x30x3 cm^3	Prod. polvere AlSiC12	Prod. profilato estruso Al	Energia prod. pannello	Prod Idruro di titanio	Prod.SiC	Trasp. materie prime
Aquatic acidification	kg SO_2-Eq. to air	**1,32E-01**	6,60E-02	5,65E-02	7,02E-03	1,40E-03	3,62E-04	1,23E-03
Aquatic ecotoxicity	kg TEG-Eq. to water	**4,18E+05**	2,01E+05	2,14E+05	4,71E+02	1,13E+03	2,91E+02	5,29E+02
Aquatic eutrophication	kg PO_4-Eq. to water	**4,22E-03**	2,09E-03	2,07E-03	8,78E-06	2,60E-05	1,71E-06	1,84E-05
Carcinogens	kg C_2H_3Cl-Eq. to air	**4,03E-01**	2,03E-01	1,97E-01	1,33E-03	9,85E-04	1,25E-04	9,19E-04
Global warming 500yr	kg CO_2-Eq. to air	**4,31E+01**	2,05E+01	1,78E+01	2,22E+00	1,28E+00	9,07E-02	1,12E+00
Ionizing radiation	Bq C-14-Eq. to air	**1,94E+03**	9,72E+02	8,41E+02	1,84E+01	2,48E+01	5,47E+00	7,99E+01
Land occupation	m2*yr-Eq.	**1,96E-05**	8,88E-06	8,59E-06	4,54E-07	3,38E-07	3,67E-08	1,29E-06
Mineral extraction	MJ surplus	**9,29E+00**	4,82E+00	4,37E+00	2,72E-02	2,66E-02	1,82E-03	5,42E-02
Non-carcinogens	kg C_2H_3Cl-Eq. to air	**1,72E+00**	8,64E-01	8,28E-01	5,73E-03	7,89E-03	1,22E-03	1,57E-02
Non-renewable energy	MJ	**5,47E+02**	2,62E+02	2,29E+02	2,90E+01	6,44E+00	2,05E+00	1,86E+01
Ozone layer depletion	kg CFC-11-Eq. to air	**3,32E-06**	1,82E-06	1,07E-06	2,03E-07	3,85E-08	1,05E-08	1,76E-07
Photochemical oxidation	kg C_2H_4-Eq. to air	**7,25E-03**	3,40E-03	2,71E-03	4,36E-04	7,96E-05	1,96E-05	6,00E-04
Respiratory effects	kg PM2.5-Eq. to air	**4,53E-02**	2,24E-02	2,01E-02	1,46E-03	3,58E-04	6,60E-05	8,91E-04
Terrestrial acidi./nutr.	kg SO_2-Eq. to air	**5,33E-01**	2,59E-01	2,14E-01	3,27E-02	5,44E-03	1,22E-03	2,14E-02
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG-Eq. to soil	**4,77E+02**	2,51E+02	1,84E+02	6,27E+00	3,40E+00	2,93E-01	3,11E+01

Anche i trasporti se pur in maniera molto inferiore hanno un certo impatto ambientale questo è dovuto al fatto che le polveri di allumino sono acquistate in Germania e vengono trasportate su gomma.

La normalizzazione al mid-point (Figura 426) mostra che la categoria con un contributo maggiore è l'acquatic ecotossicity, che incide sul totale degli impatti per 81%. Con un valore molto inferiore ci sono la categorie mineral extraction che contribuisce per l'8% e la non–carcinogenesi con il 3%.

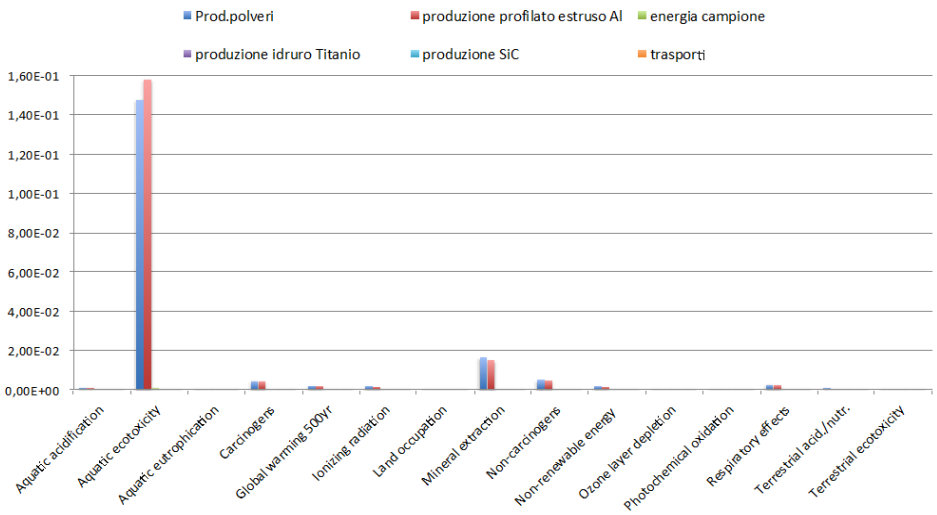


Figura 426. Grafico della normalizzazione degli impatti potenziali riferita alle diversi componenti del pannello

Nella categoria acquatic ecotoxicity, la produzione di polveri di alluminio atomizzato e del profilato in alluminio sono i processi che danno il maggior contributo. Questo è dovuto in particolare alle emissioni di metalli pesanti in acqua nel lungo periodo, in particolare il rame.

Considerato che in tutte le categorie di impatto la produzione delle polveri e del profilato di allumino, prodotte con dell'alluminio primario, è quella che dà i maggiori impatti ambientali potenziali è stata effettuata un'analisi che preveda l'uso di alluminio riciclato. Nello studio si è quindi deciso di fare un'analisi ambientale di comparazione tra il pannello AFS 40x30x3 cm^3 denominato "standard" con altri due pannelli dove si propone nel primo caso di utilizzare il 50% di alluminio riciclato (pannello 50% Al riciclato) sia nelle polvere atomizzata sia nel profilato in Al e un altro panello (pannello 100% Al riciclato) dove viene inserito il 100% di Al riciclato sia nella polvere atomizzata che nel profilato. In Figura 427 sono riportati i risultati dell'analisi.

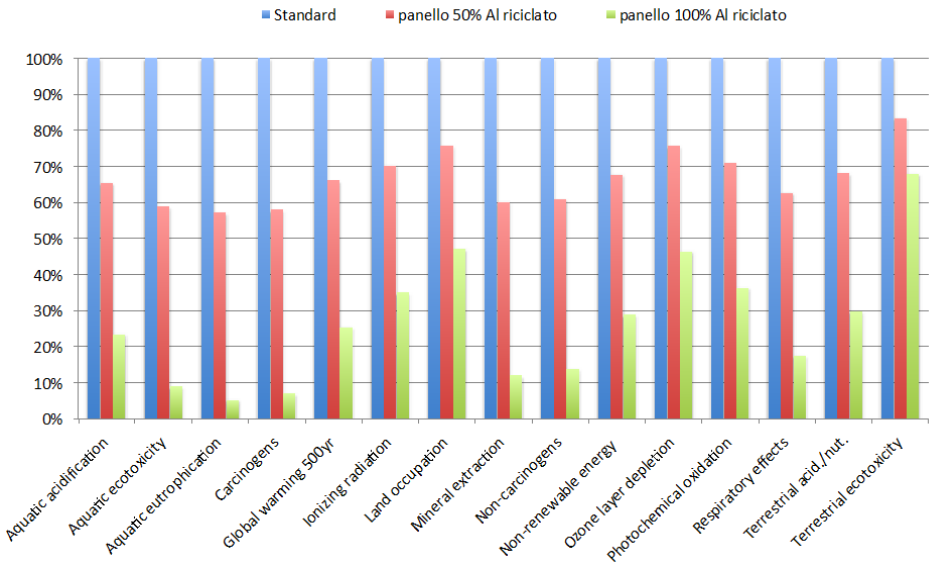


Figura 427. Grafico degli impatti (in percentuale) dei pannelli al 50 e al 100% di alluminio riciclato rispetto al massimo impatto del pannello standard

I risultati mostrano quindi l'elevato vantaggio ambientale ottenibile utilizzando allumino riciclato. Tale vantaggio inoltre aumenta in maniera crescente con l'aumentare del riciclo. La diminuzione degli impatti è diversa a secondo della categoria considerata ad esempio per quanto riguarda la categorie acquatic ecotoxicity, acquatic eutrophication e carcinogens, si ha, utilizzando interamente alluminio riciclato, una riduzione degli impatti potenziali di oltre il 90% ; la terrestrial ecotoxicity è la categoria di impatto che si mostra meno sensibile all'uso di alluminio riciclato, ma ha comunque una riduzione di circa il 31%.

Un altro elemento che dall'analisi degli impatti è risultato di un certo rilievo sono i trasporti, poiché come si diceva le polveri atomizzate di allumino sono prodotte in Germania e vengono trasportate su camion. Si è quindi valutato dal punto di vista ambientale un'ipotesi di miglioramento ambientale in cui si porta la produzione di polveri di alluminio nello stesso impianto dove verranno prodotti i pannelli AFS quindi a km0. Si considera un caso in cui il pannello è prodotto con polveri di allumino primario "AFS 40x30x3 cm^3 km0, polvere Al primario" e un altro pannello in cui si suppone che le polveri usate sono fatte di allumino riciclato al 100% "AFS 40x30x3 cm^3 Km0, polveri Al riciclato 100%". Questi due pannelli vengono confrontati con il pannello standard, in Tabella 81sono riportati i dati utilizzati per i tre pannelli.

Tabella 81. Dati utilizzati per i tre pannelli considerando km0 per il trasporto polveri

Elementi	AFS 40x30x2,4cm^3 standard	AFS 40x30x3cm^3 Km0, polvere Al primario	Elementi	AFS 40x30x3cm^3 Km0 polveri Al riciclato 100%
Profilato Al	1296 g	1296 g	Profilato Al	1296 g
Polvere atomizzata AlSiC12	1588 g	1588 g	Polvere atomizzata AlSiC12 Al riciclata 100%	1588 g
SiC	15 g	17 g	SiC	19 g
Idruro di titanio	10 g	11 g	Idruro di titanio	13g
Trasporti	0,038 tkm	0,038 tkm	trasporti	1,82
Energia	3,001 kWh	3,265 kWh	energia	3,525 kWh

In Tabella 82 viene riportata il dettaglio del calcolo dei km percorsi per il trasporto delle polveri attuale, delle polveri considerato la produzione in azienda e del profilato in Al.

Tabella 82. Riepilogo del calcolo dei trasporti

trasporto su gomma	Provenienza	km	kg	kg km	t km
Trasporto polveri attuale	Germania, Karlsruhe	1100	1620	1782	1,782
Trasporto polveri con produzione in azienda	Ipotesi produzione in azienda	0	1620	0	0
Profilati alluminio	Roma	30	1296	38,88	0,03888

In Figura 428 è riportata l'analisi di caratterizzazione dei tre pannelli, i risultati sono riportati in percentuale rispetto al pannello standard che ha gli impatti maggiori per ciascuna categoria d'impatto.

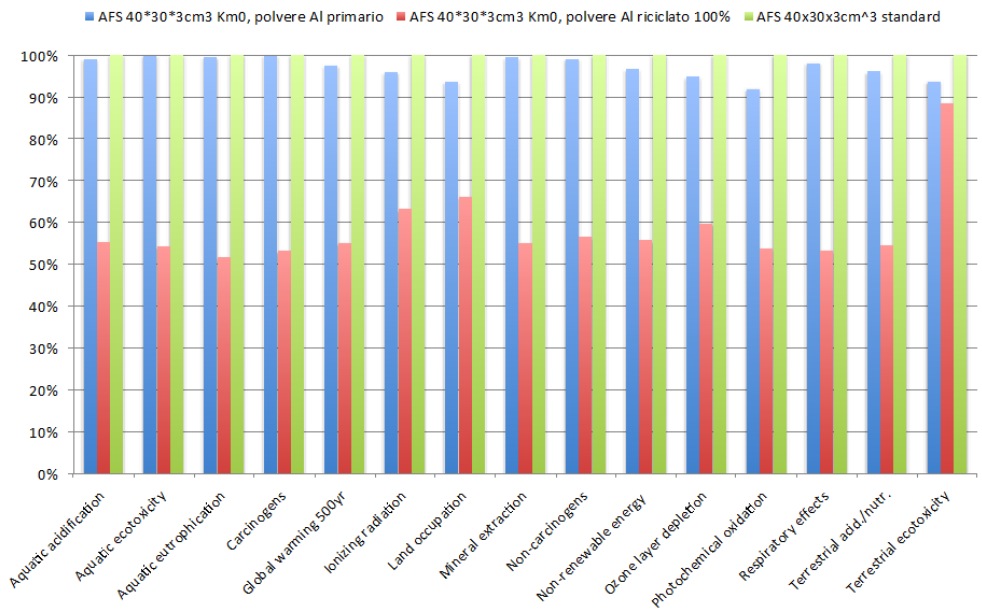


Figura 428. Grafico degli impatti in percentuale dei tre pannelli rispetto al massimo impatto data dal pannello standard

Da figura si vede che se la produzione delle polveri verrà fatta solo con allumino primario i vantaggi ambientali sono relativamente bassi oscillano dal 8% per la categoria terrestrial acid./nutr. fino a nessun vantaggio come per le categorie Aquatic ecotoxicity, Aquatic eutrophication e Carcinogens. Mentre risulta essere molto più vantaggiosa la produzione interna se si sceglie di utilizzare alluminio riciclato per la produzione delle polveri atomizzate. In questo caso i miglioramenti ambientali potenziali vanno dal 22% per la categoria di impatto Terrestrial ecotoxicity fino a miglioramenti potenziali del 48 % per la categoria Aquatic eutrophication.

Un ulteriore studio è stato effettuato considerando la variazione dello spessore delle pelli e del core del sandwich. Sono state proposte cinque geometrie diverse: per le prime due si è mantenuto costante lo spessore delle pelli pari a 2 mm per strato di pelle, con lo spessore del cuore pari a 20 mm a 23 mm rispettivamente. Le successive due invece hanno lo spessore delle pelli di 1,5 mm e di 1 mm per strato di pelle, rispettivamente, mantenendo lo spessore del cuore a 26 mm. In Tabella 83. Dati dei 5 pannelli confrontati con il pannello standard sono riportati i dati del pannello standard e dei cinque pannelli con le modifiche delle dimensioni e delle quantità considerate dovute alla modifica della geometria. Per quanto riguarda l'energia necessaria per il processo di fabbricazione, l'energia del forno non varia poiché la superficie dei vari pannelli rimane costante, mentre l'energia consumata della pressa è proporzionale al peso del precursore compattato.

I pannelli sono stati confrontati, in base alla superficie, e la Figura 429 mostra, per ciascuna categoria di impatto, l'impatto in percentuale di ciascun pannello rispetto al pannello standard. Come si vede il pannello standard risulta avere sempre gli impatti maggiori, avendo il peso maggiore. La soluzione che dà le migliori performance ambientali è quella del pannello AFS 40x30x2,8 con spessore pelle 1mm per lato e spessore cuore 2,6 cm. Questo

vantaggio è dovuto al fatto che riducendo lo spessore delle pelli del profilato di allumino si ha una considerevole riduzione in peso del pannello. Si vede inoltre che il secondo risultato migliore è il pannello AFS 40x30x3 spessore pelle 1 mm per lato e spessore cuore 2,8, dove nonostante si aumenti un po' la dimensione del cuore del sandwich risulta avere ancora impatti minori rispetto alle altre ipotesi.

Tabella 83. Dati dei 5 pannelli confrontati con il pannello standard

Elementi	AFS 40x30x2,4 cm^3 spessori: pelle 2 mm, cuore 2 cm	AFS 40x30x2,7 cm^3 spessori: pelle 2 mm, cuore 2,3 cm	AFS 40x30x2,8 cm^3 spessori: pelle 1 mm, cuore 2,6 cm	AFS 40x30x2,9 cm^3 spessori: pelle 1,5 mm, cuore 2,6 cm	AFS 40x30x3 cm^3 spessori: pelle 1 mm, cuore 2,8 cm	AFS standard 40x30x3 cm^3 spessori: pelle 2 mm, cuore 2,6 cm
Lunghezza	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm
Profondità	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm
Spessore pelle	4 mm	4 mm	2mm	3 mm	2 mm	4 mm
Spessore cuore	2 cm	2,3 cm	2,6 cm	2,6 cm	2,8 cm	2,6 cm
Profilato Al	1296 g	1296 g	648 g	972 g	648 g	1296 g
Polvere atomizzata AlSiC12	1221 g	1404 g	1588g	1588 g	1709 g	1588 g
SiC	15 g	17 g	19 g	19 g	20 g	19 g
Idruro di titanio	10 g	11 g	13 g	13 g	14 g	13 g
Trasporti	1,4 tkm	1,61 tkm	1,72	1,81tkm	1,9tkm	1,82 tkm
Energia	3,001 kWh	3,265 kWh	3,525 kWh	3,525kWh	3,698 kWh	3,525kWh

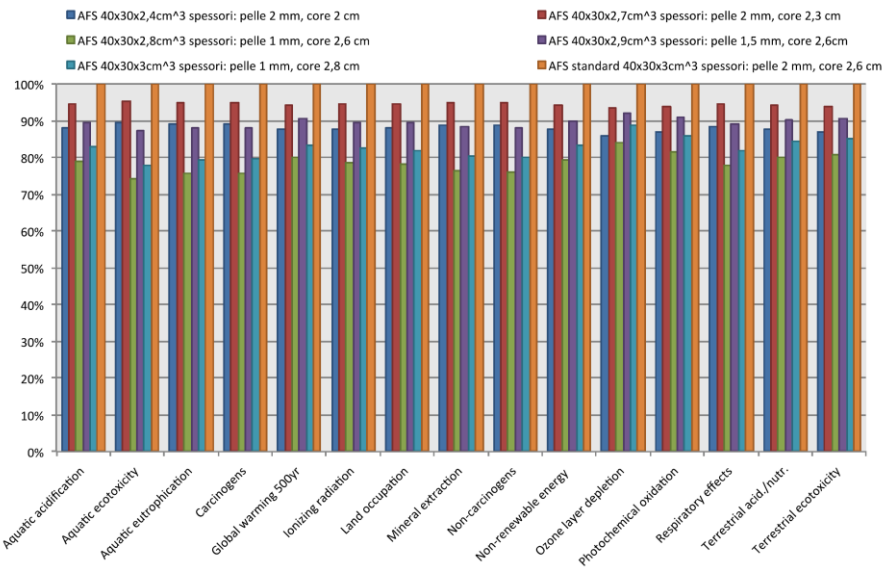


Figura 429. Comparazione percentuale degli impatti potenziali dei diversi pannelli a parità di superfice rispetto al pannello standard

Questi risultati suggeriscono che il progettista dovrebbe tendere a ridurre il più possibile lo spessore delle pelli.

In conclusione, l'analisi LCA sui pannelli AFS ha evidenziato che agendo precocemente con valutazione ambientali nella progettazione di nuovi materiali si possono ottenere utili risultati che permettono di indirizzare le successive scelte progettuali. Inoltre, scelte derivanti da criteri ambientali, possono anche dare vantaggi economici con l'uso di materiali più economici e con una logistica dei trasporti ottimizzata. Lo studio di LCA infatti evidenzia anche che nello scale-up industriale sarebbe prevedere di interiorizzare alcune fasi di lavorazione come la produzione di polveri atomizzata, che se prodotte con alluminio riciclato possono avere un impatto ambientale potenziale molto più ridotto, inoltre queste polveri tali polveri si presentano come un materiale innovativo che potrebbe avere ulteriori sbocchi sul mercato. Per maggiori approfondimenti si rimanda al Report RdS/2012/094.

C.3 Risk Assesment sulle Batterie al Litio

Questo sotto obiettivo ha riguardato da un lato l'Hazard Evaluation di celle litio ione [Report RdS/2012/095] dall'altra la progettazione preliminare di un laboratorio di verifiche sperimentali per la sicurezza dei test da effettuare per lo sviluppo o la qualificazione dei componenti basati su batterie al litio [Report RdS/2012/096].

In merito al monitoraggio ambientale effettuato dal Laboratorio di Igiene industriale della ASL di Viterbo, si osserva l'assoluto carattere preliminare. Infatti, un corretto monitoraggio può essere effettuato solo a seguito di un'identificazione delle specie chimiche da ricercare e tali monitoraggi devono essere temporalmente estesi alla durata di un ciclo completo di prova. A tal proposito sono risultati fondamentali gli studi calorimetrici e la ricerca bibliografica effettuati in ENEA (La Barbera, Padella, 2012), che vengono riassunti di seguito e che sono più compiutamente presentati nel Report RdS/2012/095, insieme ai risultati del monitoraggio ambientale e alle altre attività effettuate.

Per quanto riguarda gli studi preliminari alla progettazione di un laboratorio di verifiche strumentali per la sicurezza**,** le conoscenze acquisite nel corso dello svolgimento delle attività di ricerca appena sopra citate, il confronto con la società GBC Sicurezza srl, e gli ulteriori studi, hanno consentito di identificare le attività che si dovranno svolgere nel laboratorio in corso di progettazione e un primo gruppo di attrezzature che dovrà essere acquisito. Per i risultati complessivi di questa attività si rimanda al rapporto conclusivo, del quale, comunque di seguito si presenta una sintesi. E' d'obbligo pensare che gli investimenti prevedibili, sulla base di questo studio e del suo approfondimento, per: l'ammodernamento e messa a norma del laboratorio, i beni strumentali e l'acquisizione di due unità di personale e la loro formazione specifica, oltre a soddisfare le esigenze dei laboratori ENEA possano consentire, nel medio termine, anche la fornitura di servizi all'esterno.

Hazard Evaluation

Le celle litio ione, classificate come *Hazmat* dalle norme giuridiche che disciplinano il trasporto delle sostanze pericolose negli Stati Uniti (US DOT – United States Department of Trasportation) e *Dangerous Good* (Merci pericolose) nella normativa UN (United Nations) e ICAO (International Civil Aviation Association) recepita nei vari ordinamenti giuridici internazionali, le celle Litio Ione sono classificabili come ARTICOLI in base al regolamento Europeo REACH, per quanto riguarda il rischio incendio ed esplosione (rischi per la sicurezza), sono oggetto di studi tuttora in corso. Per quanto riguarda i rischi per la salute, dovranno essere indagate le condizioni di normale funzionamento, quelle di carica e quelle incidentali. Come anche quelle di smaltimento dei rifiuti, che potrebbero provocare rischi per l'ambiente.

Viene presentata in forma estesa la Safety Review di un sistema di accumulo realizzato con celle Litio ione, sperimentato e messo a punto all'interno dei laboratori ENEA del Centro Casaccia.

Sulla base di uno studio preliminare [Report RdS/2011/309], sono state svolte: una ricerca bibliografica finalizzata ad acquisire informazioni sulla sicurezza delle celle litio-ione e sulla normativa tecnica e giuridica ad esse applicabili, una intervista agli operatori del laboratorio, alcuni test di stabilità termica delle sostanze componenti una generica cella, alcuni monitoraggi ambientali effettuati intorno alle postazioni sperimentali.

Mediante questo caso studio è stato possibile raccogliere numerose informazioni necessarie sia per la sperimentazione in sicurezza di tali sistemi che per la progettazione dei locali destinati ad accoglierli, tra i quali possono essere inseriti anche i locali per la carica di veicoli elettrici.

Le celle al litio ione, da un punto di vista elettrochimico, sono formate da un anodo di grafite, un elettrolita (principalmente $LiPF_6$) disciolto in un solvente organico (principalmente carbonati alchilici), un catodo formato da una struttura cristallina in grado di ospitare Li^+ (generalmente ossidi metallici ma nuove tecnologie prevedono come ospite fosfato di ferro) e una membrana polimerica porosa che funge da setto separatore.

Una cella carica è costituita da grafite contenente litio (formalmente allo stato metallico) intercalato tra i suoi piani reticolari e da un catodo depauperato in litio. Al contrario, la cella scarica è costituita da grafite pura all'anodo e da ossido litiato stechiometricamente al catodo.

Da un punto di vista della sicurezza le possibili fonti di rischio derivano sia dalla formazione di componenti gassose all'interno della cella che da innalzamenti non voluti della temperatura, che portano a reazioni fuori controllo. Le componenti gassose possono essere formate sia per reazione di decomposizione elettrolita/solvente che per reazione del solvente con il carbone litiato. Fenomeni di surriscaldamento possono derivare da sovraccarica del sistema cui consegue un depauperamento di litio dal catodo tale da generare riarrangiamento strutturale e sviluppo di calore.

Uno studio di sicurezza sulle celle a litio riguarda quindi necessariamente sia l'individuazione dei gas evoluti in condizioni non ottimali di funzionamento (temperatura e stato di carica) che il comportamento del sistema in toto.

È da sottolineare che ogni specifica tecnologia, sviluppata da differenti produttori, può portare ad una differenziazione più o meno rilevante del comportamento. Le considerazioni seguenti si riferiscono a una cella commerciale Sony 18650 con catodo basato su ossido di cobalto [Sandia National Laboratory, 2004[32]] .

a) *Produzione di gas*

Una prima fonte di produzione di gas deriva dall'interazione dell'anodo con l'elettrolita. Infatti, il sistema carbone/elettrolita è termodinamicamente instabile in quanto i componenti reagiscono in maniera complessa tra loro provocando formazione di gas combustibili (es. etilene, propilene, etc.). Tuttavia, durante il primo caricamento in fabbrica si provoca la formazione di uno strato passivante all'anodo per lenta reazione controllata tra il carbonio litiato e l'elettrolita. Tale strato, identificato con il termine SEI (Solid Electrolyte Interphace), limita drasticamente la reattività tra i due materiali. L'integrità del SEI durante il ciclo di vita della cella è condizione critica da rispettare garantendo la sicurezza dell'intero sistema che altrimenti tenderebbe a procedere nella reazione carbone/elettrolita con evoluzione di gas. La reazione è fortemente esotermica e oltre una certa temperatura procede rapidissimamente per auto riscaldamento fino a fenomeni incendiari e anche esplosivi. Una inappropriata gestione elettrochimica (sovracarica/sottoscarica) così come elevate temperature di utilizzo/ stoccaggio comportano il degrado del SEI fino a rottura e rapido procedere di reazioni potenzialmente fuori controllo.

Una seconda fonte di gas deriva dal sistema elettrolita/solvente. Infatti, $LiPF_6$ è in grado di reagire con acqua (presente in tracce nella cella o a seguito di danneggiamento dell'involucro) formando LiF, PF_5, PF_3O e HF. Il solvente, in presenza di PF_5 ed HF reagisce a sua volta provocando anch'esso evoluzione di gas. Lo stesso invecchiamento di cella provoca evoluzioni di gas dall'elettrolita per decomposizione.

La letteratura riporta pochi test di caratterizzazione. Utilizzando una cella Sony 18650 sono stati condotti test sull'evoluzione gassosa mediante foratura dell'involucro allo scopo di permettere prelievi (il contatto con aria e l'umidità è stato evitato). In particolare sono state analizzate due celle. La prima, in condizioni di 100% di carica, è stata sottoposta a test dopo la prima carica, mentre la seconda ha subito preliminarmente un invecchiamento mediante mantenimento per 8 settimane all'80% di carica massima. Operando a temperature tra i 25 e i 45 °C sono stati ottenuti i risultati riportati in

Differente è l'evoluzione dei gas in presenza di umidità, condizione che può verificarsi per danneggiamento anche microscopico dell'involucro di protezione. Per tale condizione è necessario uno studio specifico da effettuare in condizioni di sicurezza, in esperimenti appositamente progettati allo scopo.

b) *Studio delle condizioni di fuga termica (Thermal Runaway)*

La letteratura riporta in dettaglio tre fasi di fuga termica delle celle:

- I fase: tra temperatura ambiente e 125°C si instaurano le condizioni di fuga termica a partire da una reazione esotermica all'anodo per decomposizione del SEI (a partire anche a temperatura di soli 50°C). La morfologia dell'anodo influenza fortemente il comportamento termico. La decomposizione del SEI porta alla riduzione dell'elettrolita per reazione con il carbone litiato e generazione di gas che aumenta con la temperatura.
- II fase: sopra i 125°C fino a 180 °C aumenta la velocità di decomposizione del solvente con CO_2, CO, C_2H_4 principalmente prodotti al catodo e H_2 all'anodo. Oltre i 140°C aumenta l'autoriscaldamento con decomposizione catodica e anodica con formazione di un sistema chimico complesso. La concentrazione di elettrolita è critica sia per la cinetica di riscaldamento che per la produzione di gas.
- III fase: oltre i 180°C si verificano numerose reazioni esotermiche con produzione di gas fino a decomposizione esplosiva. Veloci reazioni di decomposizione avvengono inizialmente tra catodo e soluzione elettrolitica (circa 140-190°C) seguite da decomposizione immediata all'anodo (circa 200-225 °C) con rilevante produzione di gas in grado di rompere l'involucro con espulsione dell'elettrolita residuo e dei gas stessi. Il materiale espulso è infiammabile e facilmente incendiabile alla presenza di una scintilla esterna.

[32] Roth EP, Crafts CC, Doughty DH, McBreen J, "Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells," Sandia Report: SAND2004-0584, March 2004.

Tabella 84. Analisi della composizione dei gas di una cella litio ione tipo 18650 (SANDIA, 2004)

		Cella non invecchiata (T_{max} di campionamento 25°C)	Cella invecchiata (T_{max} di campionamento 45°C)
H_2	% vol	8,2	0,3
	ml @ STP	0,4	0,0
Ar	% vol	4,4	27,8
	ml @ STP	2,0	2,0
N_2	% vol	6,2	9,6
	ml @ STP	0,3	0,7
O_2	% vol	0,1	1,7
	ml @ STP	0,0	0,1
CO	% vol	4,2	11,3
	ml @ STP	0,2	0,8
CO_2	% vol	12,6	26,3
	ml @ STP	0,6	1,9
CH_4	% vol	13,5	11,5
	ml @ STP	0,6	0,8
C2H4	% vol	3,1	
	ml @ STP	0,1	0,0
C_2H_6	% vol		
	ml @ STP	0,0	0,0
Fluoruro di etile	% vol		
	ml @ STP	0,0	0,0
Propilene	% vol		
	ml @ STP	0,0	0,0
Propano	% vol		0,06
	ml @ STP	0,0	0,0
Solvente	% vol	11,2	11,5
	ml @ STP	0,5	0,8
Pressione interna	PSI	38,1	59,6
Volume gas totale	ml @ STP	4,5	7.1

c) *Attività sperimentali*

Sono state effettuate sperimentazioni preliminari su materiali di partenza mediante analisi DSC ad alta pressione. Quale elettrolita è stato utilizzato $LiPF_6$ 1M disciolto in una miscela 1:1 di etilencarbonato (EC) e dietilcarbonato (DEC) e come catodo $Li(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3})O_2$. Sono stati utilizzati anche ossidi di manganese e cobalto. Tutti i sistemi non hanno mai operato in cella. In Figura 430 sono riportati i risultanti termogrammi (portacampioni da 30 µL in acciaio placcato oro per alta pressione, materiale sigillato in aria, contenente 13000 ppm di acqua, scansione a 10 °C/min). L'elettrolita mostra un segnale endotermo a circa 210 °C, che si trasforma in esotermo a 240 °C, che si mantiene tale fino a circa 280 °C. La presenza del materiale elettrodico litiato separa il segnale endotermo in tre segnali quasi indipendenti, con inizio rispettivamente a 210, 235 e 255 °C. Segue il segnale esotermo. La presenza dei semplici ossidi non litiati sembra stabilizzare il materiale elettrolitico, che mostra un solo segnale endotermo con inizio a circa 240 °C. La prova indica un ruolo significativo della presenza del litio nei materiali testati. Viene anche evidenziato, per confronto con i dati di letteratura, la necessità di lavorare su materiali estratti da celle operative, e non dai semplici substrati costituenti. Infatti, sebbene presenti tutte le indicazioni di letteratura, queste appaiono sperimentalmente di entità minore di quanto previsto. Si evidenzia pertanto, anche questo caso, la necessità di operare a partire da sistemi già sviluppati e in grado di operare.

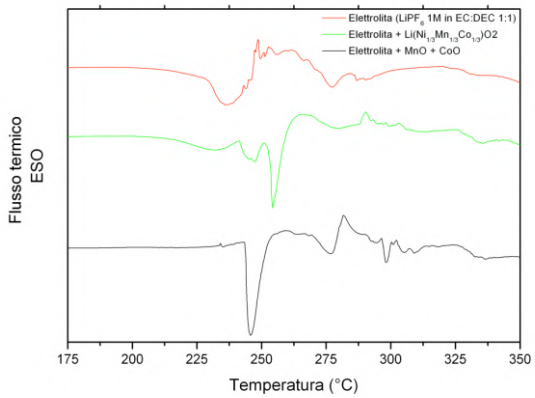


Figura 430. Analisi DSC dell'elettrolita contenente ossidi metallici (elettrolita puro riportato come riferimento)

Le analisi DSC effettuate in ENEA hanno permesso di evidenziate la natura e l'origine delle emissioni gassose pericolose all'interno di sistemi di cella litio ione. E' stato riportato il meccanismo di fuga termica con conseguenti possibilità di fiamma ed esplosione. Sia l'analisi di letteratura che le prove sperimentali eseguite hanno evidenziato la necessità di operare su sistemi reali per ognuna delle differenti tipologie di cella.

Studi preliminari alla progettazione di un laboratorio di verifiche strumentali per la sicurezza

Sono stati condotti studi preliminari alla progettazione di un laboratorio per le verifiche sperimentali di sicurezza, concepito per l'indagine di agenti fisici e chimici che si possono sviluppare nel corso delle prove di funzionamento di batterie Litio-ione in condizioni normali (carica e scarica) condotte nei laboratori ENEA [Report RdS/2012/096]. Lo studio è stato effettuato anche tenendo conto di quanto potrebbe accadere nei test di abuso che verranno effettuati nel prossimi anni a seguito della recente acquisizione di una camera climatica appositamente realizzata.

La dotazione strumentale del laboratorio viene qui proposta in forma essenziale, con l'intento di recuperare alcuni spazi già esistenti in ENEA, attraverso un opportuno piano di investimento. La dotazione organica dovrebbe essere preferibilmente costituita da un laureato magistrale in chimica o chimica industriale con esperienza nell'analisi di inquinanti ambientali e da un laureato in Tecniche della Prevenzione negli ambienti di vita e di lavoro (una nuova disciplina che forma una figura professionale prossima a quella dell'igienista industriale) esperto di monitoraggi ambientali.

Tenuto conto di quanto premesso e sulla base degli studi tuttora in corso, il laboratorio sarà un ambiente di lavoro da utilizzare per l'ispezione visiva delle celle prima e dopo le prove elettriche e di abuso, per le misure ambientali e per le misure condotte nelle vicinanze immediate dei sistemi di accumulo a base litio, nel corso della loro sperimentazione, anche durante i test di abuso che si prevede di effettuare nel futuro prossimo, a seguito della acquisizione e messa in servizio della camera climatica specifica per le prove di abuso.

L'attività presentata nel rapporto finale [RdS/2012/096] include: Identificazione delle attività del laboratorio, ovvero degli agenti fisici e chimici da misurare; identificazione delle attrezzature necessarie; identificazione del locale da adibire a laboratorio; pianificazione preliminare degli interventi di ristrutturazione.

D. Upscaling dei processi di produzione: studio e sviluppo di processi per la fabbricazione di schiume di alluminio, estrusi rinforzati e pannelli sandwich con core in schiuma di alluminio

D.1 Studio dei meccanismi di formazione del bonding metallurgico pelle-core e predizione delle caratteristiche morfologiche delle schiume mediante analisi con reti neurali

Il lavoro condotto dall'Università Roma Tor Vergata Dipartimento di Ingegneria Industriale [Report RdS/2012/097] è suddiviso in tre attività:

- simulazioni mediante reti neurali delle caratteristiche strutturali di schiume di alluminio;
- misure di spettroscopia meccanica (fattore di damping e modulo elastico dinamico) condotte da temperatura ambiente fino a 500 °C, su alcune schiume prodotte durante il primo anno di attività del progetto e per confronto su alluminio policristallino massivo;
- studio del bonding metallurgico tra schiume di alluminio e pelli di altri metalli (rame e acciaio) oppure di alluminio.

Simulazioni medianti rete neurali

Per quanto riguarda il primo punto i dati sperimentali del primo anno di attività del progetto sono stati utilizzati come *training* per due reti neurali (ANN) multi-layer; i modelli si sono rivelati degli utili strumenti per la predizione delle caratteristiche morfologiche per ogni composizione utilizzata nel processo di Metallurgia delle polveri (PM9. Questo lavoro ha permesso di trovare densità e caratteristiche morfologiche delle schiume di alluminio come funzione della composizione delle polveri. Dal momento che applicazioni differenti delle schiume di Al richiedono caratteristiche specifiche, utilizzando i risultati delle reti neurali la composizione della miscela di polveri può essere opportunamente calibrata al fine di ottenere le caratteristiche desiderate.

Nel corso della precedente annualità sono stati eseguiti esperimenti per produrre campioni in schiuma di alluminio di piccole dimensioni utilizzando il metodo delle polveri. Per i precursori sono state prese in esame miscele di polveri di alluminio, agente schiumante (TiH_2) e stabilizzante (SiC) con diverse proporzioni. In particolare, sono stati preparati due set di campioni di schiume utilizzando polveri di Al (purezza 99.5%) con diametro medio di 45 µm, particelle di SiC come stabilizzante e particelle di TiH_2 di 5 µm come agente soffiante. Ogni set era costituito da 16 gruppi di campioni (5 campioni per gruppo) combinando le seguenti quantità:

- 0.1, 0.2, 0.4 e 0.6 (% in peso) di TiH_2
- 0.8, 2.8, 6 e 9 (% in peso) di SiC.

I due gruppi si differenziavano tra loro per la dimensione media delle particelle di SiC impiegate: 35 e 60 µm. I campioni di schiuma, prodotti a partire da precursori preparati con le diverse miscele di polveri sono stati poi esaminati determinandone la densità ρ e le caratteristiche morfologiche: il diametro equivalente D_{eq} e il parametro di circolarità C di ogni bolla presente nelle sezioni.

Per interpolare i dati sperimentali e trovare le condizioni ottimali di schiumatura, due multi-layer feedforward ANN [1-2] sono state implementate nel Neural Network Toolbox di Matlab 7.

La prima rete (ANN-1) è costituita da un livello di input, quattro livelli nascosti, e un livello di output. I neuroni di input sono: (a) quantitativo di TiH_2, (b) quantitativo di SiC, (c) dimensione media delle particelle di SiC; i neuroni di uscita sono: (a) $\langle D_{eq} \rangle$, (b) D_{max}, il massimo valore del diametro equivalente nella distribuzione.

La seconda rete neurale (ANN-2) è formata da un livello di input, quattro livelli nascosti e un livello di output. I neuroni di input sono: (a) quantitativo di TiH_2, (b) quantitativo di SiC, (c) dimensione media delle particelle di SiC; il neurone di uscita è $\langle C \rangle$. L'architettura di ANN-1 e ANN-2 sono riportate in Figura 431.

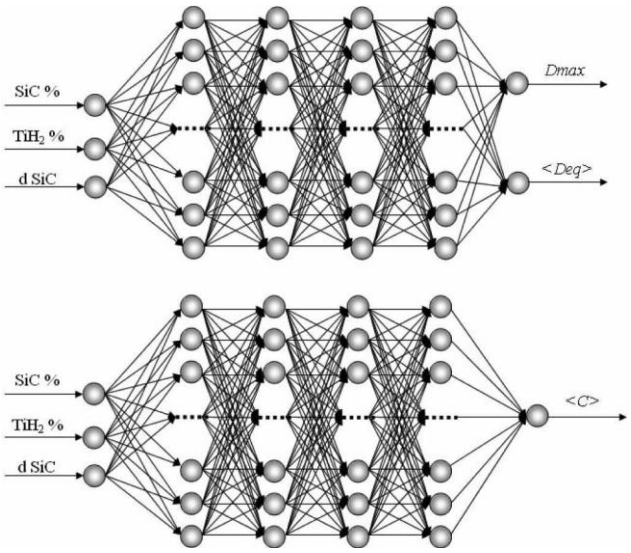


Figura 431. Architettura delle reti neurali ANN-1 e ANN-2

I dati sperimentali della Tabella 85 sono stati utilizzati per i due *training tests*. Il *training* è stato eseguito introducendo casualmente i gruppi di dati. Per entrambe le reti è stato utilizzato l'algoritmo di Back propagation con gradiente discendente e learning rate adattativo. Prima, le variabili di input ed output sono state normalizzate nel range tra 0-1.

Per testare le reti, 12 gruppi di dati per ogni set sono stati casualmente selezionati dalla Tabella 85; i restanti gruppi sono stati utilizzati come controllo. La procedura ha fornito i parametri per ottimizzare le reti (Tabella 86).

Tabella 85. Caratteristiche delle schiume prodotte con differenti quantitativi di TiH_2 e SiC. I set 1 e 2 differiscono per la dimensione delle particelle di SiC utilizzate nella miscela

SiC particle size		$d = 37$ µm (set 1)			$d = 60$ µm (set 2)		
SiC (%)	TiH_2 (%)	$\langle D_{eq} \rangle$ (mm)	Standard deviation	$\langle C \rangle$	$\langle D_{eq} \rangle$ (mm)	Standard deviation	$\langle C \rangle$
0.8	0.1	1.70	0.45	0.75	2.20	0.46	0.62
2.8	0.1	1.40	0.36	0.64	1.75	0.75	0.75
6	0.1	1.20	0.49	0.85	1.80	0.96	0.74
9	0.1	1.20	0.49	0.66	1.40	0.86	0.70
0.8	0.2	3.10	1.16	0.61	2.70	0.78	0.67
2,8	0.2	2.60	0.88	0.80	2.55	0.85	0.65
6	0.2	2.40	0.76	0.80	2.25	1.03	0.58
9	0.2	2.75	1.12	0.66	2.00	1.02	0.65
0.8	0.4	2.60	1.23	0.63	3.20	0.84	0.76
2.8	0.4	3.00	1.55	0.60	2.90	1.22	0.64
6	0.4	3.00	1.34	0.59	3.65	1.96	0.58
9	0.4	2.45	1.07	0.61	2.90	1.58	0.73
0.8	0.6	2.00	1.23	0.52	2.70	1.09	0.76
2.8	0.6	2.50	1.17	0.49	3.70	1.33	0.66
6	0.6	2.45	1.13	0.59	4.50	1.77	0.65
9	0.6	2.55	1.18	0.59	2.70	1.44	0.66

Tabella 86. Parametri di Training e Validation di ANN-1 e ANN-2

Parameters	ANN-1	ANN-2
Number of input neurons	3	3
Number of neurons in the first hidden layer	32	18
Number of neurons in the second hidden layer	82	2
Number of neurons in the third hidden layer	102	45
Number of neurons in the fourth hidden layer	22	15
Number of output neurons	2	1
Learning rate	0.02	0.01
Ratio to increase learning rate	2	1.2
Ratio to decrease learning rate	0.9	0.9
Maximum validation failures	5	5
Maximum number of epochs to train	8000	8000

Dopo l'istruzione delle reti neurali con i dati sperimentali sono stati effettuati dei test di validazione che hanno mostrato come per entrambe le reti neurali (ANN-1 e ANN-2), la differenza tra le predizioni e i dati sperimentali è confrontabile con lo scattering dei dati sperimentali. Quindi, è stata ottenuta una buona implementazione delle reti neurali che possono diventare potenti strumenti nell'ottimizzazione dei parametri delle schiume metalliche.

Misure di spettroscopia meccanica

Per certe classi di materiali le caratteristiche di damping sono tecnologicamente molto importanti, per esempio se viene richiesta una grande capacità di smorzare rumore e vibrazioni. Questo è proprio il caso delle schiume metalliche.

Molte delle potenziali applicazioni delle schiume metalliche sono legate alle loro proprietà di assorbire energia, smorzare il suono e attutire le vibrazioni meccaniche. In Giappone sono già state impiegate come materiale per barriere antirumore lungo la linea dello Shinkanzen.

La Spettroscopia Meccanica (SM) è una tecnica sperimentale che può dare a riguardo preziose informazioni. Le prove di SM forniscono il *modulo elastico dinamico* ed il *fattore di smorzamento* Q^{-1} (damping) in un esteso intervallo di temperatura. La sperimentazione può inoltre essere condotta ad ampiezza di vibrazione costante o variabile. Una questione tuttora aperta è la dipendenza del damping dall'ampiezza di vibrazione delle schiume e, più in generale, dei materiali porosi. Inoltre, tali prove sono molto interessanti poiché, come le prove di trazione, permettono la misurazione del modulo di Young *E* ma con tecniche dinamiche. Queste sono fondamentalmente di due tipi.

1. Si utilizzano ultrasuoni e si misura la loro velocità υ di propagazione nel materiale. Da

$$\upsilon = \sqrt{E/\rho}$$

conoscendo la densità ρ si può determinare *E.*

2. Si misura la frequenza di risonanza *f* di provini di geometria nota. Essendo *f* funzione del modulo elastico *E* e della densità ρ, si può quindi determinare E.

Gli esperimenti di SM possono essere realizzati mediante diversi dispositivi sperimentali con frequenze di lavoro che variano in un ampio intervallo, dalla frazione di Hz fino a svariati GHz.

L'apparato utilizzato per le prove è dotato di un sistema per inseguire automaticamente la frequenza di risonanza allorché questa varia al variare della temperatura durante l'esperimento. Si possono utilizzare i modi naturali flessionali di vibrazione di campioni sagomati in forma di laminette. Inoltre, lo strumento lavora in alto vuoto per ottenere la massima sensibilità di misura ed evitare qualsiasi contaminazione del campione. E' dotato di un sistema di riscaldamento costituito da una struttura cilindrica in quarzo che sostiene il filamento riscaldato per effetto Joule. La potenza dell'alimentatore in DC è controllata dal software di gestione che permette di programmare sia rampe di temperatura a velocità di riscaldamento costante sia isoterme.

Tutte le operazioni sono completamente automatizzate; un programma controlla l'insieme di tutte le funzioni operative, l'acquisizione dei dati sperimentali e la loro elaborazione in tempo reale.

Sono state eseguite delle misure di spettroscopia meccanica su alcuni campioni preparati durante l'attività del primo anno che avevano una densità relativa $\rho/\rho_0 = 0{,}2$.

I valori di Q^{-1} e di modulo elastico dinamico *E* sono stati registrati ogni 10 secondi durante un riscaldamento dei campioni da temperatura ambiente fino a 500 °C con velocità di 1 °C al minuto. Le prove sono state ripetute più volte variando l'ampiezza di deformazione, cioè applicando sollecitazioni crescenti ai provini che determinavano

crescenti ampiezze di vibrazione. Per confronto gli stessi test sono stati eseguiti anche su alluminio policristallino 4N in forma massiva.

a)

b)

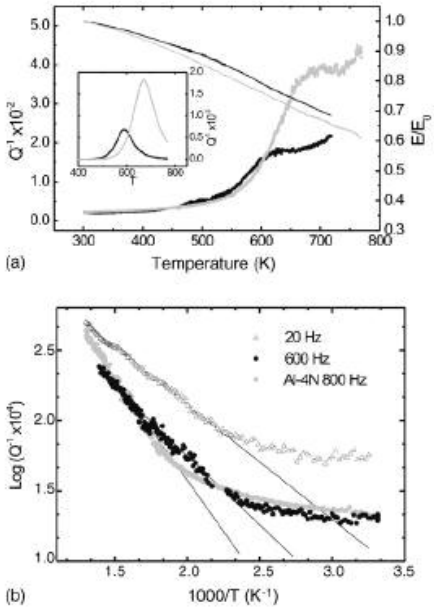


Figura 432. a) Q^{-1} e modulo elastico dinamico *E* per la schiuma di alluminio (cerchi neri) e per alluminio policristallino 4N in forma massiva (cerchi grigi); nella cornice riportata all'interno della figura sono mostrati i picchi di Q^{-1} dopo la sottrazione del fondo; b) Fitting del damping di fondo alle alte temperature per la schiuma misurato con diverse frequenze di sollecitazione (triangoli vuoti e cerchi neri) e per l'alluminio massivo (cerchi grigi)

La Figura 432a mostra le curve di Q^{-1} della schiuma di alluminio (cerchi neri) e dell'alluminio massivo (cerchi grigi). Ciascuna curva è la sovrapposizione di un fondo con andamento esponenziale e di un picco dovuto ad un fenomeno di rilassamento che interessa i bordi di grano (picco di Ke).

Lo studio attuale focalizza l'attenzione sul fondo. Come mostrato in Figura 432a, la schiuma di alluminio misurata con una ampiezza di deformazione molto bassa, $<10^{-5}$, mostra un damping di fondo di $1–2\times10^{-3}$ fino a circa 150 °C (423 K), valore che è addirittura un po' più basso di quello dell'alluminio policristallino in forma massiva.

Il fondo a bassa temperatura della schiuma cresce fino a $4–5\times10^{-3}$, diventando confrontabile con quello dell' alluminio massivo quando l'ampiezza di deformazione arriva a 10^{-4} .

Questo risultato è in accordo con quanto visto da Liu et al.[33] Che hanno messo in evidenza che il damping delle schiume di alluminio aumenta aumentando la porosità e diminuendo la dimensione dei pori, decresce con la frequenza della sollecitazione ed aumenta con l'ampiezza di deformazione. Per meglio definire la dipendenza del damping dall'ampiezza si è osservato che le oscillazioni presentano caratteristiche di non-linearità, che le curve di risonanza sono asimmetriche e le frequenze di risonanza sono proporzionali al quadrato dell'ampiezza.

Il damping di fondo alle alte temperature, Figura 432b mostra un semplice andamento esponenziale, $Q^{-1} = A \exp(-B/kT)$, nell'intervallo di temperatura 450 - 700 K.

Studio del bonding metallurgico tra schiume di alluminio e pelli

È stata effettuata una serie do esperimenti per realizzare giunzioni metallurgiche tra schiume di alluminio con pelli sia di alluminio che di metalli differenti (rame e ferro). I due casi presentano aspetti e difficoltà pratiche molto diversi.

La saldatura con metalli aventi punto di fusione maggiore (rame e ferro) di quello dell'alluminio è stata realizzata con successo facendo formare la schiuma a contatto del metallo della pelle. La superficie del metallo deve essere preventivamente pulita meccanicamente con carte abrasive per rimuovere la strato naturale di ossido, quindi

[33] C. S Liu, Z. G. Zhu, F. S. Han, J. Banhart, Journal of Materials Science, Vol. 33, N. 7 (1998), 1769-1775.

deve essere trattata con un disossidante per evitare che la saldatura sia compromessa dalla formazione di ossido durante l'esposizione in temperatura.

Nello specifico, il precursore della schiuma viene sistemato in un tubo col fondo chiuso, realizzato nel metallo che costituirà la pelle. Poi si pone tutto nel forno riscaldando alla temperatura prevista per la schiumatura dell'alluminio, cioè a 700 °C. In temperatura, la schiuma cresce assumendo la forma del tubo e realizzando, una volta terminata la crescita, la saldatura col metallo del tubo nei punti di contatto. Una rappresentazione schematica è riportata in Figura 433.

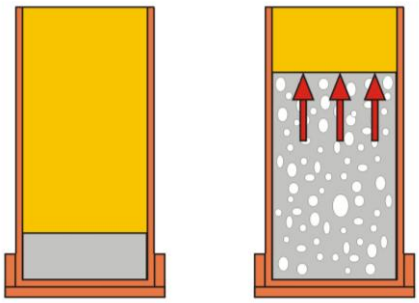


Figura 433. Rappresentazione schematica del processo per realizzare la saldatura metallurgica tra la schiuma di alluminio e la pelle di un metallo differente

La Figura 434 mostra la macrografia della giunzione e l'analisi puntuale SEM di un campione con pelli in rame commercialmente puro e schiuma di alluminio.

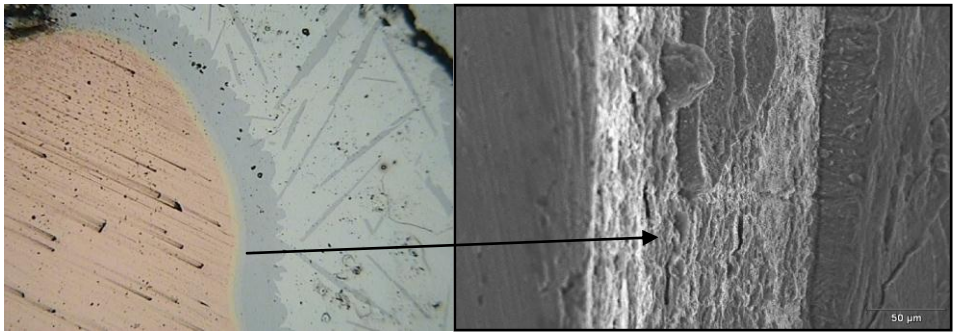


Figura 434. SX Sezione macrografica del legame fra pelle in rame e schiuma di alluminio; a DX l'immagine SEM

Nello spettro EDS della zona di saldatura, tra la schiuma di alluminio e la pelle di rame (Figura 435) sono presenti i picchi relativi ai costituenti della schiuma (Al, Si), il picco del Cu di cui è costituita la pelle e si segnala la presenza di ossigeno, dovuta all'ossidazione dell'alluminio.

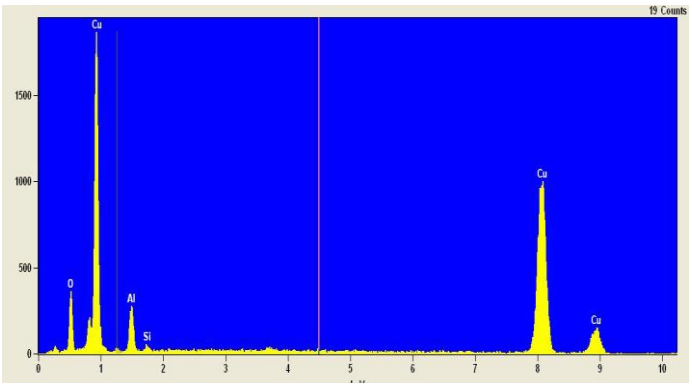


Figura 435. Spettro EDS in cui si distinguono i picchi del Cu, Al, O, Si

Sia le immagini al microscopio ottico che la distribuzione degli elementi nella zona di giunzione mostrano la formazione di una saldatura metallica tra la schiuma di Al e la pelle di Cu.

Analogamente, di seguito sono riportate le macrografie e le analisi SEM riferite ai campioni realizzati con precursore AlSi e pelle in acciaio al carbonio micro legato (Figura 436).

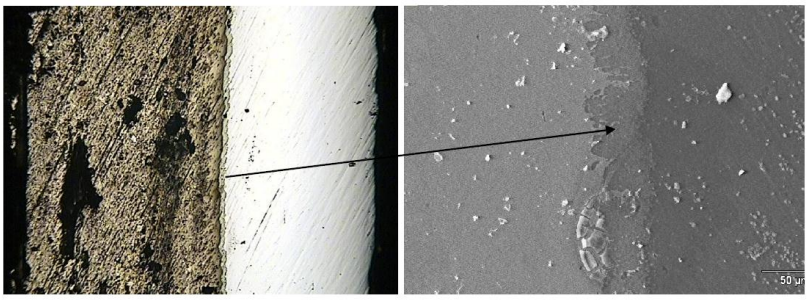


Figura 436. SX Sezione macrografica del legame fra pelle in acciaio e schiuma di alluminio; a DX l'immagine SEM

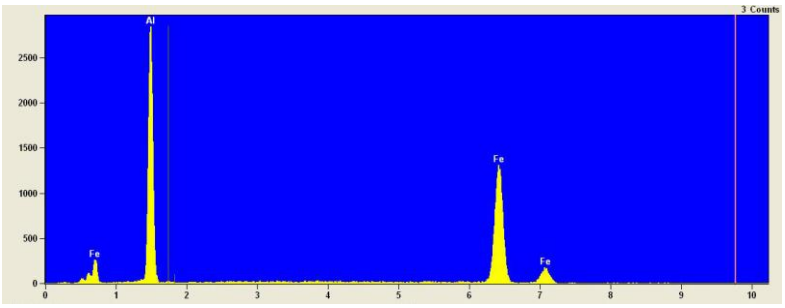


Figura 437. EDS in cui si distinguono i picchi di Al, Fe

Anche in questo caso si osserva la formazione di un ottimo legame metallurgico. L'analisi EDS mostra i picchi di Fe ed Al (Figura 437) ma in alcune analisi EDS sono stati anche evidenziati piccoli picchi di Si, contenuto della schiuma, e di Cr contenuto nella pelle dell'acciaio. Molto interessante lo studio del contenuto di alluminio e ferro nella fase intermedia della giunzione che mostra come in una regione di saldatura intermedia, spessa circa 30 micron, da composta dal 50% in peso di Al e 50% in peso di Fe (Figura 438).

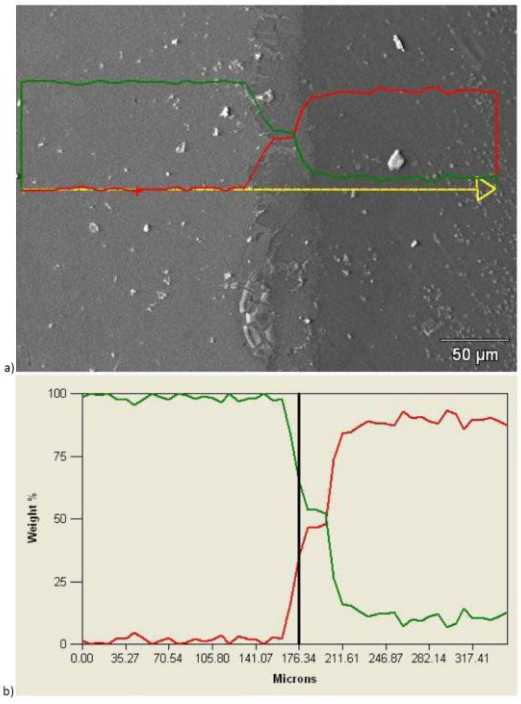


Figura 438. a) Andamento della percentuale in peso dell'Al (linea rossa) e del Fe (linea verde) nella zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle in acciaio; b) Percentuale in peso del Fe (verde) e Al (rosso) nella zona di giunzione tra la schiuma di Al e la pelle in Fe

D.2 Processi di fabbricazione di profilati estrusi rinforzati con schiuma metallica

Questa attività ha riguardato la calibrazione del forno di schiumatura per la realizzazione di compositi metallo-metallo costituiti da un profilato in Alluminio AA6060 e da un *core* in schiuma metallica ottenuto mediante la schiumatura di un precursore commerciale Alulight eutettico di tipo AlSi10 contente lo 0,8%p di agente schiumante TiH_2 [Report RdS/2012/098].

Una prima fase di set up e calibrazione del forno di schiumatura e la definizione delle finestre dei parametri di controllo, temperatura e tempo, e la loro correlazione (anche mediante Design of Experiment) con i dati di risposta, principalmente espansione e densità, considerando un piano sperimentale fattoriale con tre livelli di tempi di schiumatura, due livelli di temperatura e due condizioni di raffreddamento, effettuato con due repliche.

Con i dati derivanti dall'analisi di immagine e dall'analisi DOE (riferita anche alle misure di espansione mediante sensore laser) sono stati effettuati test di schiumatura in cilindri estrusi, di diametro 30 mm, altezza 40 mm e spessore di parete 2 mm, con l'obiettivo di raggiungere una densità del core di 0,055±0,05 g/cm^3. I parametri per questi test sono stati definiti considerando i limiti imposti alla temperatura massima (per evitare la fusione o l'eccessivo rammollimento dell'estruso) e utilizzando tempi ottimizzati in funzione delle maggiori masse in gioco, rispetto alla schiumatura di semplici granuli di precursore.

In sintesi, la Figura 439 mostra il forno di schiumatura e la configurazione di prova che ha previsto, dopo la prima fase, l'impiego di due crogiuoli contemporaneamente posizionati il primo in posizione centrale, con l possibilità di monitoraggio continuo dell'espansione tramite sensore laser, il secondo sul lato sinistro della camera del forno per verificare l'influenza della posizione. In entrambi i casi la temperatura dei campioni è stata monitorata con termocoppie inserite nel piattello di appoggio in rame del crogiolo.

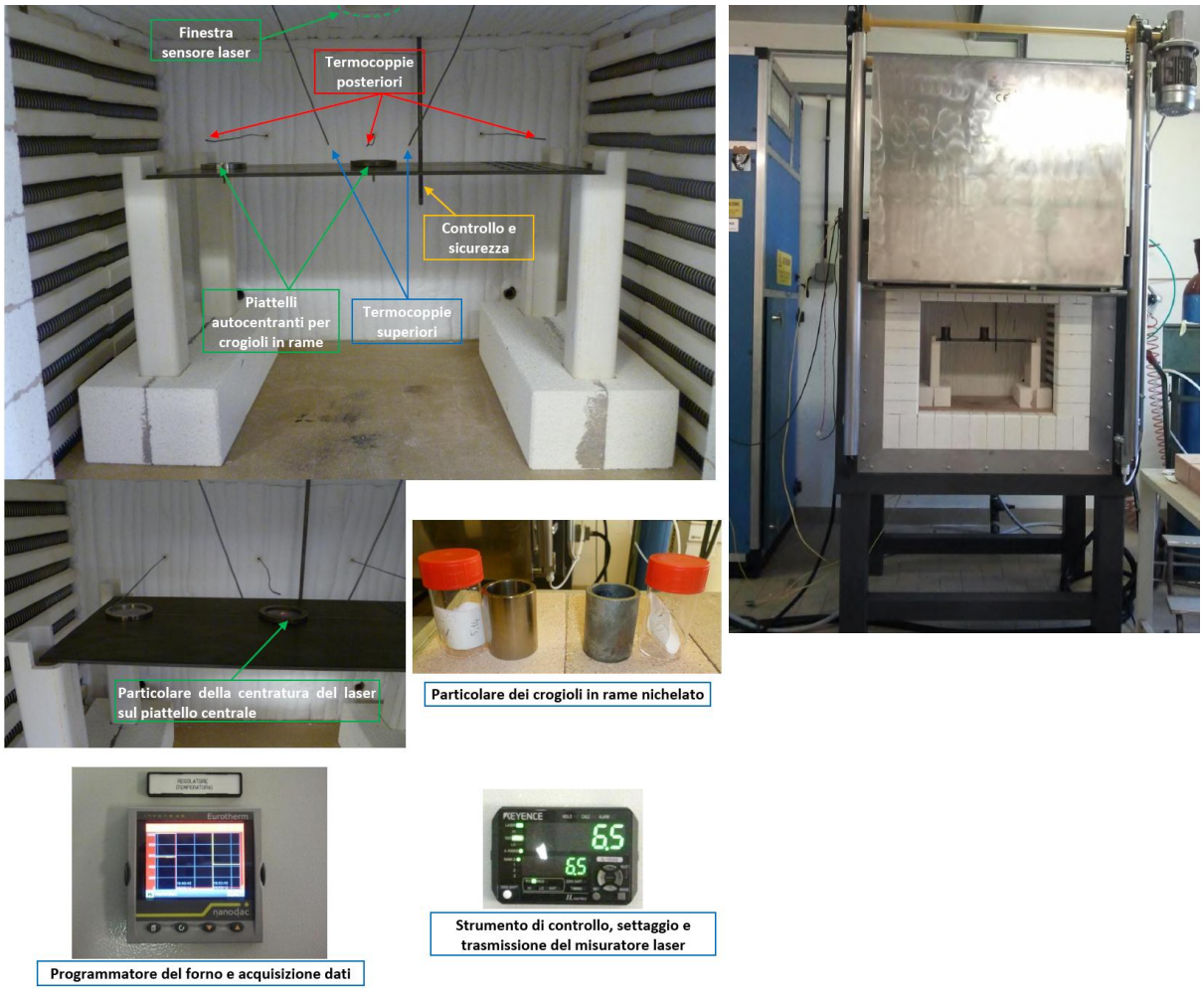


Figura 439. Set up sperimentale e sistemi di monitoraggio e controllo del processo di schiumatura nel forno VLT

L'ottimizzazione dei parametri per la realizzazione di granuli porosi è stata effettuata con il piano fattoriale completo di seguito riportato:

- temperatura impostata per il forno (2 livelli: 615 e 645 °C);
- tempo di permanenza del campione a partire dalla richiusura della porta (3 livelli: 11, 15 e 19 minuti)
- modalità di raffreddamento (2 livelli: acqua, aria)

L'intervallo di temperatura è stato scelto tenendo conto dell'obiettivo finale del lavoro che riguarda la realizzazione di estrusi in AA6060 rinforzati con schiuma metallica. Considerando che la temperatura di fusione dell'estruso è di circa 652 °C, la temperatura di fornace è la massima applicabile senza portare a fusione l'estruso. Allo stesso modo utilizzare temperature troppo basse, inferiori a 615° C, realizzerebbe un processo di schiumatura estremamente lento con perdita dell'efficacia dell'agente schiumante che subirebbe una decomposizione troppo lenta per generare porosità di morfologia accettabile.

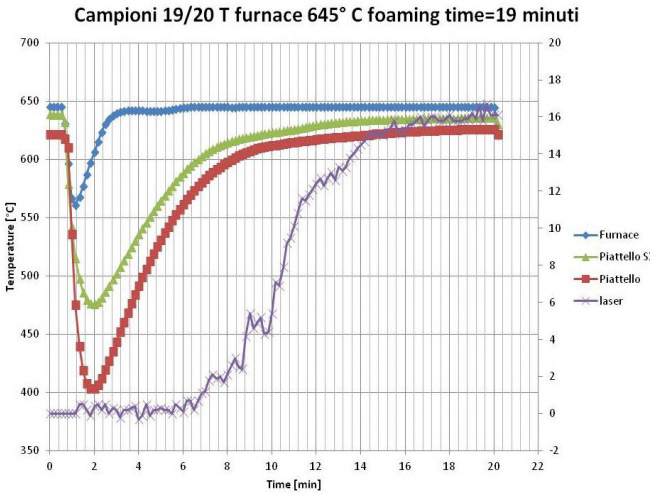
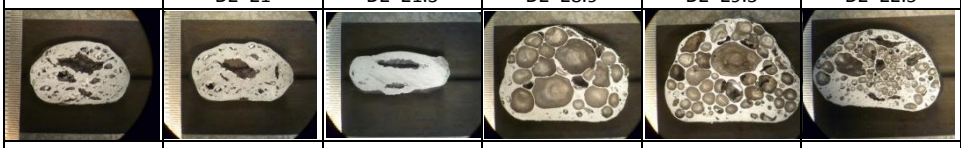
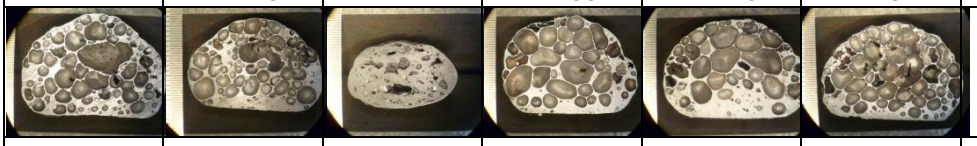


Figura 440. Prova di schiumatura 19-20 (645°C / 19 minuti)

Un esempio delle curve di controllo e monitoraggio dei test è riportato in Figura 440. In particolare, nel grafico viene mostrato il ciclo termico della prova sia per la $T_{furnace}$, utilizzata per il controllo della prova come parametro di settaggio, sia della temperatura del piattello centrale e del piattello di sinistra, sopra il quale sono posizionati i campioni. Questa prova in particolare riporta i test effettuati per $T_{furnace}$ 645°C con il tempo di schiumatura di 19 minuti e raffreddamento finale in aria. Oltre al monitoraggio della temperatura viene riportata l'espansione (H-h) del sensore laser. Il parametro di risposta preso come riferimento per l'analisi dei piani sperimentali è infatti l'espansione (H) ovvero la dimensione massima del campione a fine prova. Il sensore laser rileva (H-h) con "h" l'altezza iniziale del precursore che è pari a 5 mm. Le prove hanno dimostrato come il monitoraggio on line con sensore sia efficace: l'errore è valutabile in +/- 0.5 mm rispetto alle misure rilevate a fine prova con calibro.

La Tabella 87, a titolo di esempio, mostra i risultati delle prove effettuate con raffreddamento in aria.

Tabella 87. Riepilogo dei dati relativi alle prove con raffreddamento dei campioni in aria.

Centro	**13**	**15**	**17**	**19**	**21**	**23**	**Sample**
	13.6	12.6	9.5	20	21.5	15.6	**H [mm]**
	D1=22 D2=20	D1=22.1 D2=21	D1=21.5 D2=21.3	D1=27.5 D2=28.9	D1=28.9 D2=29.3	D1=21.5 D2=22.5	**Forma**
							**Macro**
	1.11	1.18	1.71	0.56	0.51	0.91	**Density**
Sinistra	**14**	**16**	**18**	**20**	**22**	**24**	**Sample**
	20.8	18.6	14.2	20.1	20	20.3	**H [mm]**
	D=29.5	D1=26.7 D2=27.5	D1=23.2 D2=22	D1=29.9 D2=28.9	D2=28.9 D2=27.3	D1=26.8 D2=28.7	**Forma**
							**Macro**
	0.56	0.65	1.13	0.52	0.59	0.57	**Density**
	19'	**15'**	**11'**	**19'**	**15'**	**11'**	**Time**
	615	**615**	**615**	**645**	**645**	**645**	**Temp**

I test hanno evidenziato che, se è vero che il processo complessivo viene controllato dalla temperatura del forno, i risultati dipendono dalla reale temperatura del campione e quindi dalla posizione che esso ha nel forno (Figura 441).

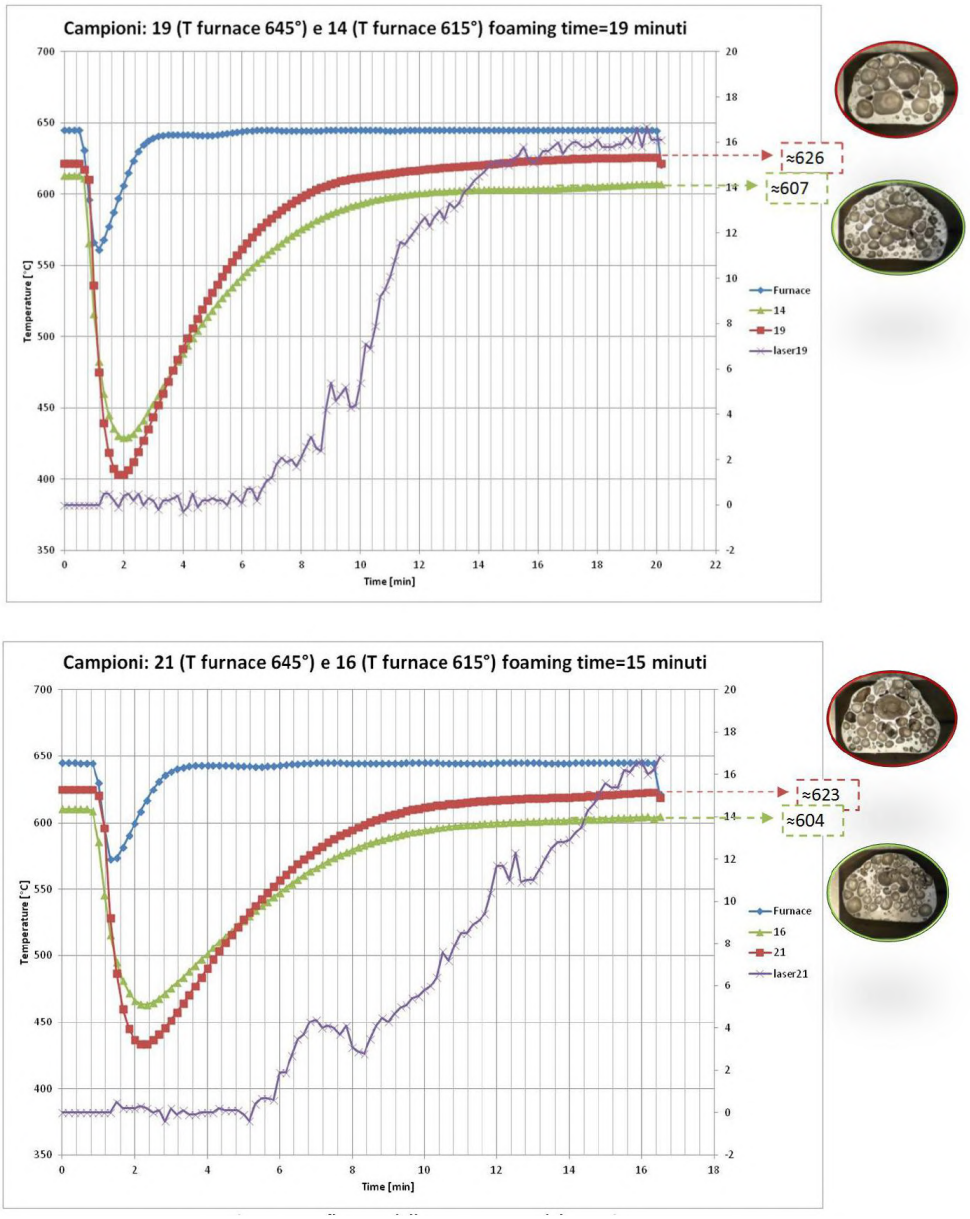


Figura 441. Influenza delle temperatura effettiva del campione sulla morfologia dei granuli porosi prodotti

Alla temperatura del campione di circa 626 °C si osserva, come ipotizzato esaminando la curva di espansione, che presenta un andamento asintotico dopo i 15 minuti, una coalescenza delle porosità, che diventano più grandi e meno numerose. Risultano invece confrontabili i risultati in termini di distribuzione delle porosità e densità, per il campione 21 (T_{sample} circa 623 °C, tempo 15 minuti, H=21,5 mm e densità 0,51 g/cc) con quelli del campione 14 (T_{sample} circa 607 °C, tempo 19 minuti, H= 20,8 e densità 0,56). Questo indica la possibilità di ridurre i tempi di schiumatura con temperature più alte, ma allo stesso tempo la possibilità di ridurre le temperature di schiumatura, ad esempio per realizzare estrusi di alluminio rinforzati, utilizzando un tempo maggiore.

Analisi DOE dei piani fattoriali

I piani sperimentali, anche sotto forma frazionata, sono stati analizzati con tecniche di Design of Experiment (DOE) con l'ausilio del programma Minitab® 16.0. Le analisi hanno confermato di fatto le indicazioni già evidenziate.

L'analisi del piano fattoriale ridotto considerando solo i due livelli di tempo estremi 11 e 19 minuti mostra che per quanto riguarda l'espansione gli effetti principali significativi (α=0.05) sono in ordine di importanza:

- il tempo di schiumatura;
- l'interazione fra tempo e tipo di raffreddamento;
- la temperatura del forno.

Per quanto riguarda la densità sempre in ordine di importanza abbiamo:

- il tempo di schiumatura;
- la temperatura del forno.

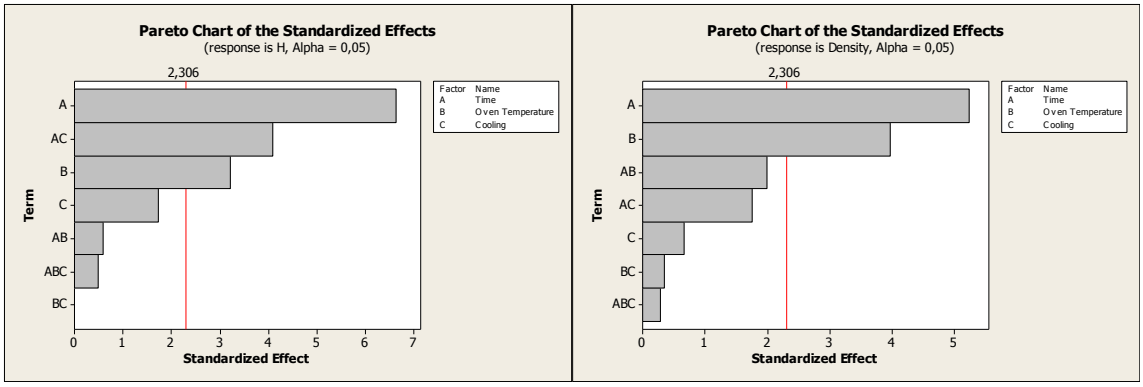


Figura 442. Analisi PARETO dell'influenza dei parametri e delle interazioni fra parametri sull'espansione e la densità

Accorpando nuovamente tutti i dati in un unico piano fattoriale (con tre livelli di tempo)otteniamo i grafici di interazione della Figura 443. In particolare, per quanto riguarda l'espansione:

- la variazione di temperatura del forno ha effetto maggiore col tempo di prova di 15 minuti e in ogni caso con l'aumentare della temperatura aumenta l'espansione;
- il differente sistema di raffreddamento ha maggior effetto per il tempo di prova di 19 minuti e ha effetti contrastanti fra i piccoli e i grandi tempi di permanenza;
- il modo di raffreddamento ha maggior effetto per le temperature più alte.

Per quanto riguarda la densità:

- la variazione di temperatura del forno ha i maggiori effetti relativi per tempi decrescenti da 19 a 11 minuti;
- il differente sistema di raffreddamento ha influenza molto limitata che diminuisce con l'incremento dei tempi di permanenza in forno;
- il differente sistema di raffreddamento ha effetti maggiori a 615° mentre ha un effetto assai limitato a 645°C;

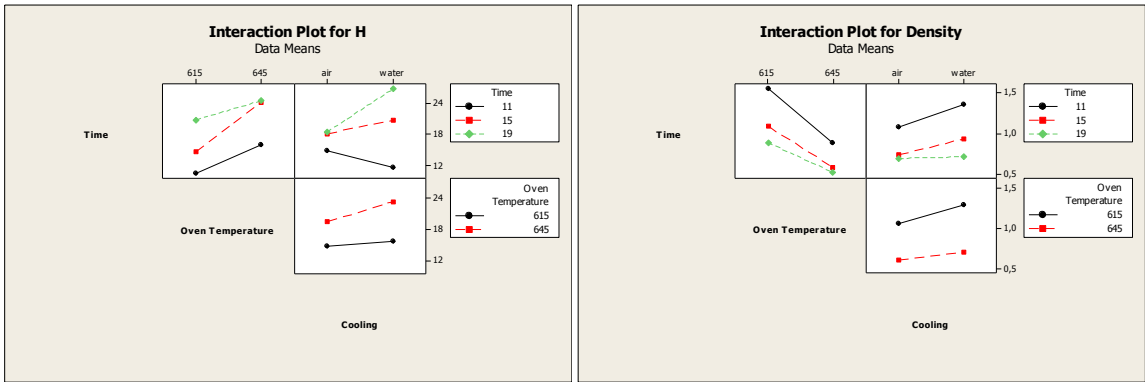


Figura 443. Grafici di interazione fra i parametri del piano fattoriale completo

Nella figura seguente è riportato l'andamento della densità in funzione di tempo e temperatura della fornace e il grafico inerente la possibile finestra di ricerca dei parametri ottimali per avere una densità compresa fra 0,5 e 0,6 mm ed un'altezza della schiuma fra 20 e 24 mm.

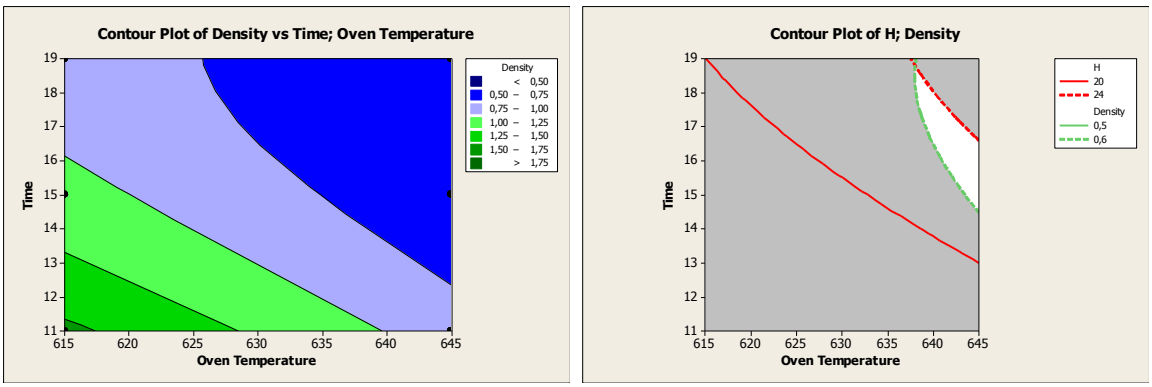


Figura 444. Grafico dell'andamento della densità in funzione della temperatura del forno e del tempo e finestra di desiderabilità per il piano sperimentale complessivo

Considerata la dipendenza dei risultati dalla reale temperatura del campione è stata effettua un'analisi DoE considerando la temperatura campioni che viene sintetizzata dai grafici seguenti.

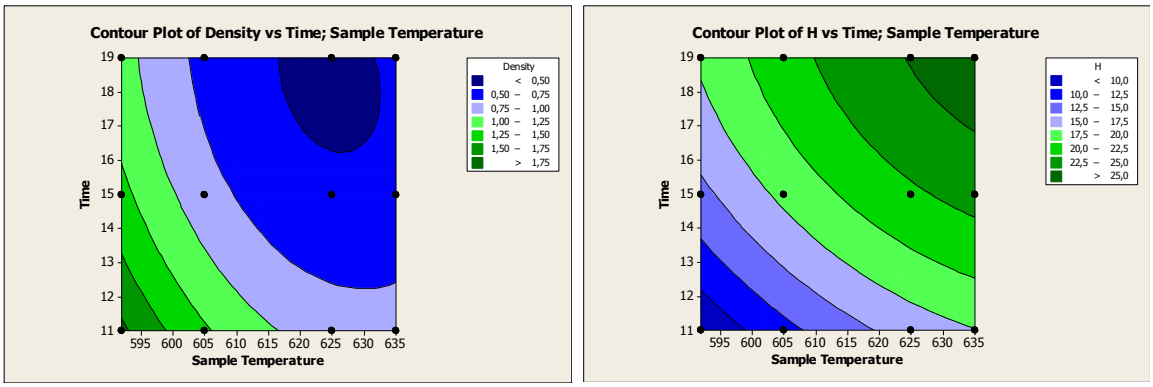


Figura 445. Grafico dell'andamento dell' espansione e della densità in funzione della temperatura del campione e del tempo.

L'utilizzo dell'ottimizzatore o dei grafici di inserzione permettono di identificare i parametri di prova per una desiderata coppia di valori di espansione e densità consentendo, in generale, di ottimizzare i parametri considerando fino a 25 parametri di risposta con differente peso ed importanza.

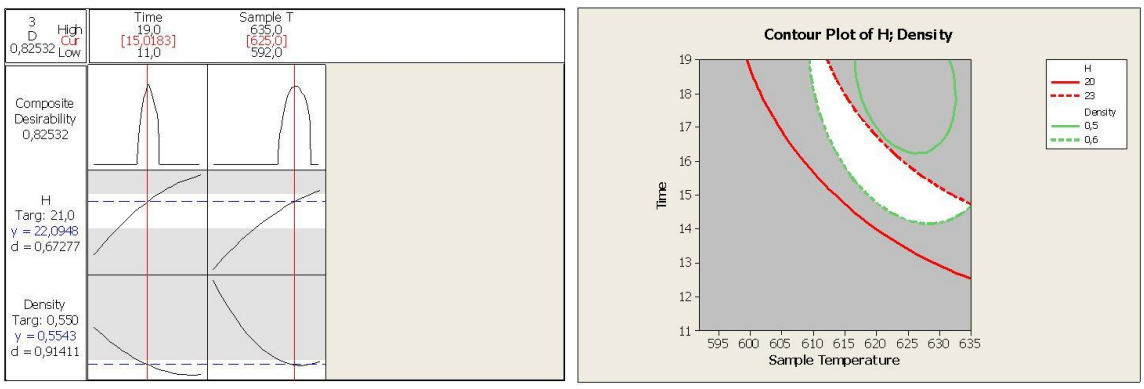


Figura 446. Ottimizzazione dei parametri di risposta con Minitab

Produzione di estrusi di alluminio rinforzati con schiuma

Lo studio effettuato ha permesso di individuare un range di temperature e di tempi entro cui poter lavorare per ricercare i parametri di schiumatura entro profilati estrusi della serie AA6060.

Le analisi DSC [Report RdS/2011/204] mostrano infatti come la temperatura di fusione della specifica lega sia di 652,9°C in linea con i riferimenti di letteratura, che pongono la temperatura di fusione per questa lega nel range compreso fra 651 e 654°C.

Il set up di prova, in termini di rilievo della temperatura e posizionamento dei campioni, è simile a quanto fatto per la schiumatura del solo precursore. In particolare, sono cambiate le masse in gioco mentre rimane il crogiolo in rame.

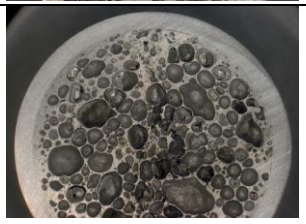
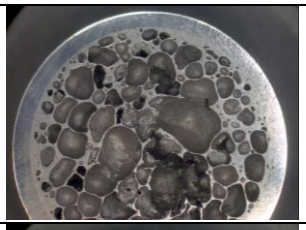
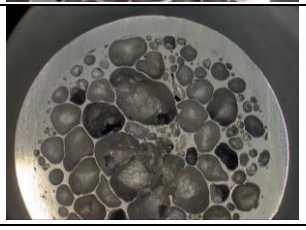
I campioni di precursore sono passati da circa 5 g a circa 12 g suddivisi in due parti di diametro 10 mm e altezza 30 mm, cui va aggiunto il profilato estruso che ha diametro 30 mm, spessore di parete di 2 mm ed altezza 40 mm con un peso di circa 18 g. Per evitare infiltrazione di aria di raffreddamento del sistema di misura laser, per questi test non è stata registrata l'espansione on line, in modo da perturbare meno possibile la distribuzione di temperatura nel forno.

Nelle Tabella 88 e 89 si riportano i parametri delle prove realizzate e i risultati ottenuti.

Tabella 88. Test su campioni cilindrici di 40 mm di altezza

ID	$T_{furnace}$ [°C]	Posizione	T_{sample} [°C]		Foaming Time [min]
			Equilibrio	Finale	
C1	630	Centro	622,5	606	15
C2	630	Sx	624,5	611	15
C3	630	Centro	625	617,5	20
C4	630	Sx	628	623,5	20

Tabella 89. Aspetto superficiale e sezione macrografica

ID	Top	Macro
C1		
C2		
C3		
C4		

L'osservazione dei campioni mostra che il campione C1 centrale non ha raggiunto i valori di espansione necessari per ridurre la densità della schiuma a 0,55 g/cm^3. Inoltre, si osserva ancora la divisione dei due precursori utilizzati per la prova. La sezione macrografica, realizzata a metà campione, mostra pori di dimensione di 2-3 mm in periferia, che crescono di dimensione verso il centro. Il campione C2, più vicino alla parete del forno e alle resistenze, mostra un maggiore rigonfiamento e in superficie non è più distinguibile la separazione tra i pezzi di precursore originali che tuttavia è possibile notare nella sezione macrografica.

In entrambi i casi un risultato inatteso è l'intimo legame che si osserva fra core in schiuma e profilato. Per quanto le parti siano infatti ancora ben distinguibili, dato il differente colore delle due leghe, sulla maggior parte della circonferenza si ha una struttura continua.

Per i campioni C3 e C4, schiumati per un tempo maggiore (20 minuti rispetto ai 15 minuti dei primi due), l'espansione dei precursori ha portato al risultato cercato ovvero un'espansione per l'intera dimensione dell'estruso, che porta ad una densità del core inferiore a 0,55 g/cm^3 in entrambi i casi. L'aspetto e la sezione macrografica per entrambi questi campioni non mostra più traccia della divisione originale dei due precursori. I pori sono omogenei sempre con una tendenza alla crescita dalla periferia verso il centro.

Sono state infine effettuate delle prove esplorative per verificare la possibilità di triplicare la dimensione dei profilati estrusi portandone la lunghezza da 40 a 120 mm e triplicando ovviamente il volume di precursore utilizzato. La configurazione prevede la posizione in verticale dei campioni, in quanto il caricamento manuale dei campioni è possibile solo con l'impiego dei crogioli.

Questi test hanno mostrato come all'aumentare della dimensione dei campioni vadano rivisti i parametri di schiumatura soprattutto in termini di tempo. I 20 minuti sufficienti ad una schiumatura completa per un estruso di 40 mm non sono abbastanza per la schiumatura completa in un estruso di altezza 120 mm specialmente della configurazione obbligata, in assenza di un sistema di carico e scarico automatico per campioni di dimensione maggiore (che è stato oggetto di definizione delle specifiche ed acquisto in questa annualità, vedi Report RdS/2012/099).

Il risultato finale è mostrato in Figura 447 dove è possibile osservare come nella parte bassa del campione (lato sx della figura) si sia creata una sorta di tappo di spessore 1 mm con le bolle che crescono di dimensione man mano che si sale verso il centro del campione per poi ridursi al di sotto di 1 mm. Il dato estremamente positivo è che comunque è visibile un ottimo legame fra pelle e core, il dato preoccupante è invece la fusione localizzata del profilato estruso che può verificarsi quando questo è posizionato in prossimità degli elementi scaldanti.

Figura 447.Campione C6 con schiumatura verticale parziale di dimensione 80 mm

Il lavoro svolto ha permesso di ottimizzare i parametri di schiumatura dei precursori in AlSi10, in termini di dimensioni ma anche di densità. Per la realizzazione di granuli porosi è possibile fissare la temperatura del forno nel range 615-645 °C ed ottenere densità fino a 0,50 g/cm^3 con tempi compresi fra 15 e 17 minuti.

Per campioni di dimensione limitata non si è osservata una grossa differenza fra il raffreddamento in acqua e il raffreddamento in aria: in questo intervallo di temperature, poco al disopra della temperatura di fusione della lega, la riduzione di espansione e volume dovuta alla riduzione di pressione dell'idrogeno è stata limitata ed evidente solo per tempi eccessivi e temperatura di fornace di 645 °C.

Il mancato utilizzo di acqua per il raffreddamento è stato testato con successo anche su campioni di dimensione rappresentativa di diametro 30 mm e altezza 40 mm.

Il raffreddamento in aria porta a manufatti che hanno una maggiore lucentezza e quindi un migliore aspetto superficiale esterno ed una forma più tondeggiante delle bolle interne.

L'espansione rilevata con sensore laser è stata sempre corrispondente all'espansione misurata "a freddo" con calibro fuori dal forno. Piccole riduzioni sono state osservate solo nel caso di raffreddamento in aria di campioni processati con temperature di fornace 645 °C e tempi maggiori di 15 minuti.

E' evidente l'influenza delle masse in gioco nell'ottimizzazione dei parametri di processo. Questo comporta che, per ogni macrocomponente sviluppato, è necessario eseguire una specifica campagna di ottimizzazione dei parametri.

Inoltre, i risultati cambiano notevolmente in funzione alla posizione del campione nel forno, il che comporta la necessità di inserire degli schermi in corrispondenza degli elementi riscaldanti ed eventualmente implementare un sistema di convezione forzata per aumentare l'omogeneità della temperatura.

La problematica riscontrata è certamente legata al fatto che, con temperature limitate, il processo di espansione è più lento e ben controllabile a patto di riuscire a garantire un riscaldamento omogeneo e un controllo della temperatura accurato sul campione, eventualmente con appropriati cicli di settaggio del forno che potranno essere ottimizzati una volta a disposizione il modulo di carico e scarico automatico.

Tale modulo permetterà anche di utilizzare campioni di dimensione maggiore in posizione orizzontale garantendo una più uniforme distribuzione della temperatura nel precursore e una minore influenza della gravità sulla distribuzione delle porosità

Il risultato quasi sorprendente è che comunque, anche con temperature limitate, sono stati realizzati dei campioni di estrusi rinforzati con schiuma, di dimensione in linea con gli obiettivi del progetto, con un legame fra core e pelle che a livello microscopico sembra avere un buon collegamento e buona tenacità.

In linea con gli obiettivi del progetto si è quindi passati dallo studio e l'ottimizzazione di campioni in DSC di dimetro 6,5 mm e spessore 0,7 mm a campioni di 30 mm di diametro e 40 mm di altezza producendo un upscaling in termini di volume superiore a 1000 volte.

D.3 Procedimenti e progettazione di apparecchiature prototipali per la produzione di precursori per schiume metalliche ed AFS

In questa attività sono state sviluppate le conoscenze sui procedimenti per la compattazione di precursori semplici e precursori compositi per Aluminium Foam Sandwich (AFS) e sono state individuate leapparecchiature prototipali per la compattazione e per l'ausilio alla schiumatura, come il sistema di carico e scarico automatico per poter realizzare componenti di maggiore dimensione [Report RdS/2012/099].

Sono stati analizzati tutti i possibili metodi di compattazione per precursori da utilizzare come riempimento di scatolati e/o estrusi, considerando anche le ultime applicazioni industriali, come la estrusione diretta da polveri con tecnologia di estrusione Conform™ e le nuove tendenze nel settore della ricerca come la compattazione High Velocity Compactation (a impatto) e la Equal Channel Angular Pressing (ECAP) che sfrutta le forze di taglio per ottenere la compattazione senza passare tramite una riduzione di sezione.

Per lo studio dei parametri di compattazione su componenti rappresentativi, il lavoro si è tuttavia concentrato sullo sviluppo di un procedimento basato sulla compattazione uni assiale seguita da una estrusione come alternativa più economica all'impiego della pressatura isostatica e la successiva estrusione.

è stato effettuato uno studio preliminare per individuare i parametri di compattazione, non solo di precursori in alluminio puro [Report RdS/2011/201 Università Roma Tor Vergata], ma soprattutto di leghe eutettiche. Infatti, i precursori da polveri di alluminio puro, per quanto ottenibili più semplicemente, anche solo mediante pressatura uni assiale (data la duttilità di queste polveri), impongono la necessità di superare la temperatura di fusione dell'alluminio e quindi di una qualsiasi altra lega da estrusione, per ottenere la schiumatura motivo per cui non sono adatti allo sviluppo di estrusi di alluminio rinforzati.

I campioni sono stati preparati utilizzando polveri di AlSi12 con diametro medio di 44 µm, SiC con dimensione media di 31 µm, TiH_2 con dimensione media di 44 µm. La miscela di polveri per i campioni prevede una composizione fissa contenente il 2,8 %p di SiC e lo 0,4 %p di TiH_2 questo valore è la metà di quanto utilizzato nei precursori commerciali ed è stato scelto in relazione ai risultati delle attività svolte nella precedente annualità con l'intento di ridurre i costi di produzione di questi materiali, costi in cui il TiH_2 incide maggiormente. Le polveri sono state qualificate dal punto di vista microscopico con analisi SEM, DCS e con prove TGA per le quali si rimanda al Report RdS/2012/099.

La compattazione uni assiale è stata realizzata con la pressa di laboratorio di 20 t per pasticche estremamente piccole (diametro 5 mm, di spessore 1 mm) ed è avvenuta a temperatura ambiente, con pressioni crescenti 450 MPa. Il grafico di Figura 448 mostra come, per le polveri di alluminio, il raggiungimento di una densità relativa al il

raggiungimento di una densità relativa superiore al 95% avviene già a 350 MPa, mentre per le polveri Al Si12, più dure e meno duttili pur portando la pressione a 450 MPa, la densità relativa è solo di poco superiore all'87%.

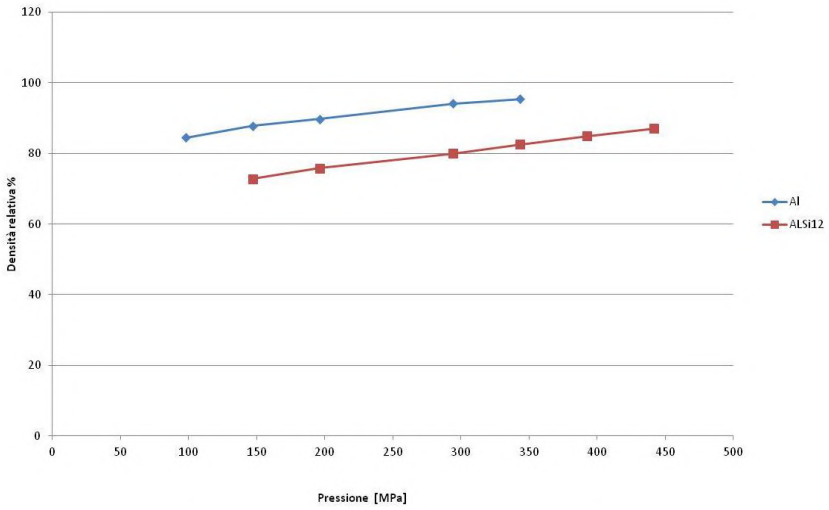


Figura 448. Andamento della densità con compressione monoassiale con due differenti tipi di polveri

Le successive prove di schiumatura in DSC hanno mostrato come il limitato grado di densificazione non permette di ottenere risultati confrontabili con prodotti commerciali che hanno una densità relativa superiore al 95% (Figura 449).

Sulla base di questi risultati sono state definite le caratteristiche del sistema di compattazione per precursori di dimensione rappresentativa da applicare sulla pressa da 100 t OMCN acquisita nel corso del precedente PAR.

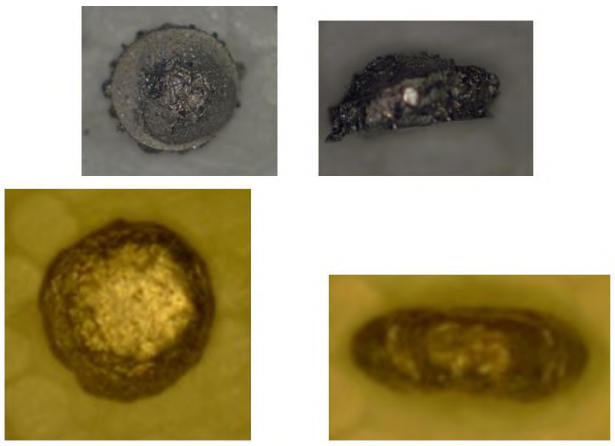


Figura 449. Risultati inerenti la schiumatura in DSC: in alto il precursore realizzato in ENEA con densità relativa 87%, in basso un precursore commerciale similare con densità relativa > 95%

Sistema di compattazione per precursori eutettici

La compattazione uniassiale è certamente il metodo più semplice da implementare per la realizzazione della compattazione della miscela di polveri. Come evidenziato dalle prove effettuate le pressioni in gioco dipendono dal tipo di polveri utilizzate e dalla temperatura considerata. Il progetto dell'attrezzatura ha preso in considerazione da un lato la pressione massima utilizzata a freddo per la compattazione dei precursori per DSC di miscela AlSi10, dall'altra la possibilità di ridurre queste pressioni lavorando a caldo.

L'apparecchiatura è stata sviluppata per essere applicata alla pressa OMCN da 100 t di portata. Per il controllo della pressione è stata acquisita una cella di carico GEFRAN di tipo torico con fondo scala 100 t. L'impiego di una cella di carico toroidale ha permesso di sviluppare l'attrezzatura con il doppio funzionamento: pressatura e estrusore.

Inoltre, la possibile applicazione di un riscaldatore MST, esterno al mantello del cilindro di pressione, ha reso necessario prevedere un sistema di raffreddamento, per evitare il danneggiamento della cella di carico o una sua deriva nella misurazione del carico.

L'attrezzatura si presta ad up scaling applicando sulla stessa base due differenti mantelli e cilindri di pressatura: ciò permette di studiare come la dimensione (diametro ed altezza) del cilindro di compattazione influenzi il grado di compattazione del precursore cioè la sua densità relativa e omogeneità.

In particolare, sono stati definiti mantelli con cilindro di pressatura in acciaio da utensili da 30 e 50 mm di diametro. La compattazione della miscela di polveri a freddo, considerata una pressione di 500 MPa, comporta quindi un carico di 353,5 kN contro i 981 kN di portata della pressa nel caso del cilindro da 30 mm, mentre si raggiunge la saturazione della portata della pressa nel caso si vogliano raggiungere i 500 MPa di pressione, per campioni di diametro di 50 mm.

La Figura 450 mostra la sezione del sistema di pressione con mantello e cilindro di pressatura di diametro interno 30 mm.

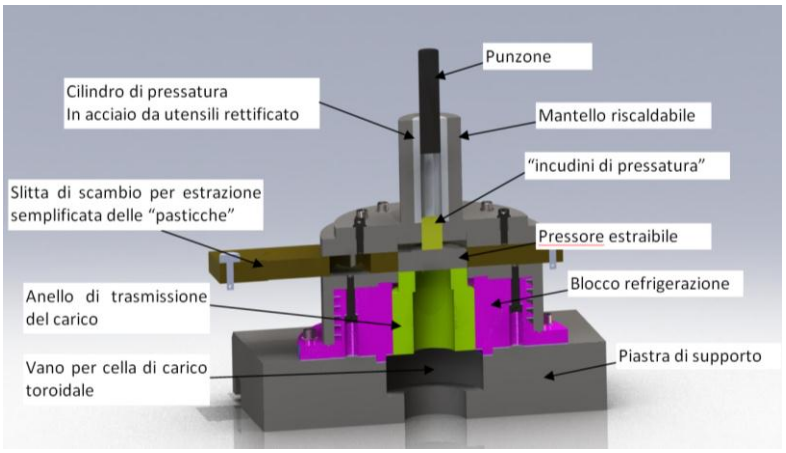


Figura 450. Rendering della sezione del sistema di compattazione per precursori di diametro 30 mm

Sia il cilindro di pressatura che le "incudini" di altezza 50 mm sono in acciaio da utensili e rettificate. Questo consente l'impiego sia a freddo, con pressioni molto elevate, sia a caldo (fino a 300 °C) senza avere deformazioni apprezzabili. Il cilindro di pressatura è inserito con una leggera interferenza nel mantello esterno, sia per permettere una elevata resistenza a spanciamento laterale, tipica della configurazione delle condotte forzate, sia per una buona trasmissione di calore dal mantello al cilindro di pressatura.

Il pressore e l'anello di trasmissione del carico sono liberi di muoversi verticalmente con il movimento del punzone e quindi la pressione delle incudini viene trasmessa direttamente alla cella di carico. Per l'estrazione del precursore dopo compattazione, si solleva il punzone e si sposta la slitta da sinistra a destra dove è presente un foro. L'applicazione nuovamente del carico con il punzone permette di estrarre le "incudini" e il precursore compattato.

L'impiego di un "pressore" forato e di una matrice di estrusione al posto dell'incudine inferiore trasforma il compattatore in un piccolo estrusore per una maggiore compattazione dei precursori.

Per maggiori dettagli sul funzionamento, i componenti e la progettazione degli stessi si rimanda al rapporto completo che contiene anche tutti i disegni esecutivi dell'attrezzatura.

L'attrezzatura realizzata e collaudata presso il fornitore sarà utilizzata nel corso

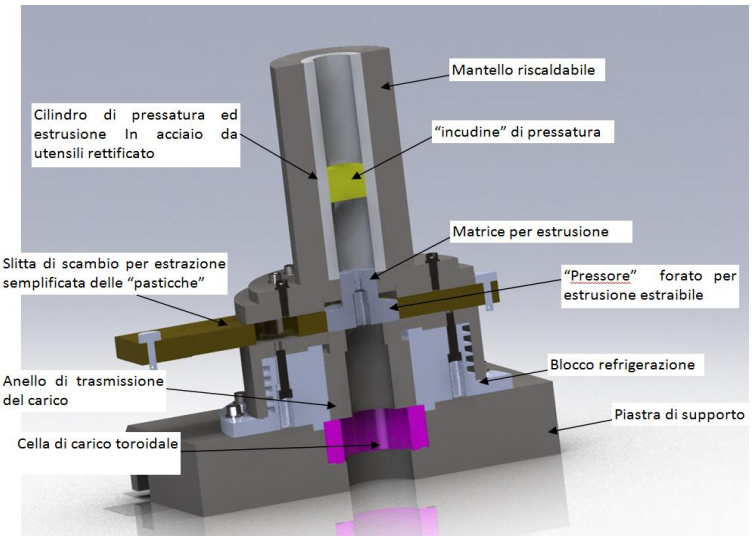


Figura 451. Rendering della sezione del sistema di compattazione in configurazione estrusione per precursori di diametro 50 mm

del prossimo anno per l'uspaling della miscela per precursori eutettici sviluppata a base di polveri di AlSi12 con l'impiego oltre che di Idruro di titanio anche di agenti schiumanti economici alternativi come il carbonato di calcio.

Figura 452. Attrezzature completa nella configurazione di compattazione 50 mm con tutte l parti per adattarsi a compattazione a caldo da 30 mm e d estrusione 10 mm

Modulo Camera Fredda (MCF)

Per la manipolazione di campioni di dimensione rappresentativa previsti come obiettivo a termine delle attività è necessario implementare un sistema di manipolazione di campioni di dimensioni fino a 400 mm x 200 mm. Sulla base delle esperienza maturate sullo specifico forno di schiumatura acquisito nel corso del PAR 2008-2009 sono state definite le specifiche di affinamento del Modulo Camera Fredda standard della ditta produttrice del forno per avere un immediato ed efficace funzionamento sui campioni di nostro interesse. La Figura 453 mostra lo schema di funzionamento e le fasi di collaudo dell'apparecchiatura.

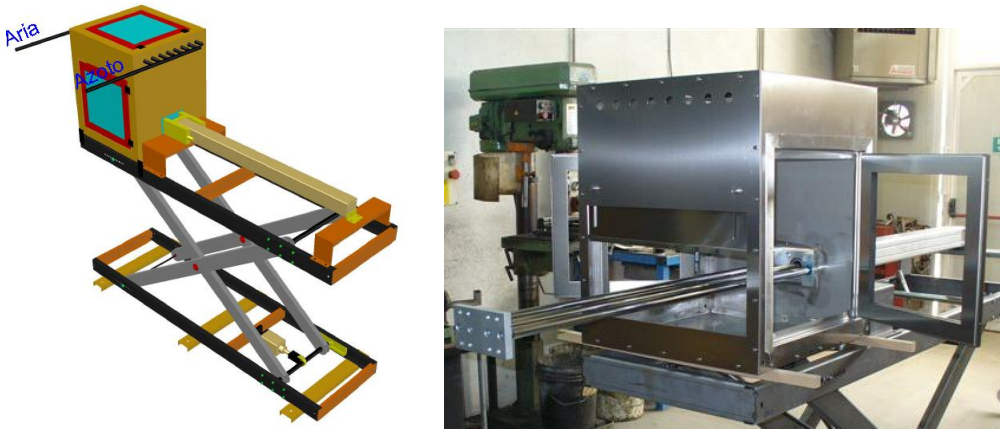


Figura 453. Schematizzazione del sistema di carico e scarico automatico (Modulo Camera Fredda) del forno di schiumatura specifico VLT e foto durante le fasi di collaudo

Lo studio effettuato ha permesso di identificare le principali tecnologie di compattazione che vengono utilizzate industrialmente per la produzione di precursori. Tali dati sono di difficile reperimento, per ovvie ragioni di riservatezza tuttavia, grazie al contatto diretto con le aziende produttrici e ad alcune indicazioni ricavate dalle ultime pubblicazioni appare ormai chiaro che, per la produzione di precursori, la metodologia consolidata è l'impiego della Cold Isostatic Pressing per la prima compattazione che realizza dei lingotti da sottoporre a successiva estrusione a caldo. L'estrusione aumenta ulteriormente la compattazione, realizza la frantumazione dell'allumina intorno ai grani di polvere e omogeneizza la distribuzione degli agenti schiumanti e nucleanti.

Questo processo può essere semplificato utilizzando un sistema di estrusione Conform™ adattato direttamente all'impiego delle polveri evitando la fase di pressatura isostatica.

Nuovi approcci alternativi riguardano la realizzazione della compattazione con lo sfruttamento principalmente di forze di taglio, con il processo Equal Channel Angular Pressing method - ECAP o la compattazione ad impatto HVC.

D'altro lato per la compattazione dei precursori pelle-precursore-pelle per pannelli AFS è necessario effettuare una laminazione di un involucro sigillato con la miscela di polveri all'interno. La compattazione avviene per step successivi di laminazione, che introducono stress di taglio in grado di frantumare le particelle garantendo l'ottenimento di un precursore interno ben compattato ed omogeneo.

I test di compattazione con apparecchiature di laboratorio hanno mostrato i limiti di applicabilità anche su pasticche di piccola dimensione, della sola compattazione uni assiale. E' stata quindi sviluppata un'apposita apparecchiatura da applicare alla pressa OMCN da 100 t, acquisita nel corso del PAR 2008-2009 in grado di performare sia la compattazione monoassiale sia l'estrusione successiva.

Anche in questo caso l'apparecchiatura sviluppata in fase di collaudo ha portato ad un upscaling a partire da pasticche di 5 mm di diametro e 1 mm di altezza a compattati fino a 50 mm di diametro e 50 mm di altezza.

Inoltre è stato acquisito il Modulo Camera Fredda per completamento del sistema di schiumatura in forno. Tale modulo, adattato alle esigenze di progetto permetterà di testare campioni di dimensione maggiore permettendo una maggiore ripetibilità, l'impiego di crogioli caldi e cicli termici complessi e controllati che permetteranno il miglioramento ulteriore in termini di qualità anche su campioni di dimensione maggiore ai 30-40 mm.

E. Sviluppo di procedure fabbricazione, progettazione e simulazione del comportamento di componenti di dimensione rappresentativa per l'alleggerimento strutturale di vettori per il trasporto

E.1 Analisi locale a risoluzione sub-micrometrica degli stress residui e correlazione con il comportamento a rottura macroscopico di AFS

Il lavoro condotto dall'Università Roma TRE, Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Industriale [Report RdS/2012/100] come prosecuzione della attività avviate nel corso del PAR 2008-2009 è suddiviso in due attività:

1. sviluppo di metodologie innovative ad alta risoluzione per la misura locale degli stress residui all'interno delle singole fasi individuate sulle pareti cellulari di schiume in alluminio;
2. sviluppo, e trasferimento ad ENEA, di metodologie in non-contatto per la mappatura bidimensionale ad alta risoluzione del campo di deformazione nel corso di prove meccaniche macroscopiche su pannelli sandwich caratterizzati da core in schiuma di alluminio, tramite l'utilizzo di tecniche di correlazione digitale di immagine (Digital Image Correlation, DIC).

Analisi locale a risoluzione sub-micrometrica degli stress residui (micro-stress) in differenti zone del pannello ed identificazione dei trattamenti termici di distensione ottimali

Uno dei parametri di maggiore interesse per la corretta comprensione del comportamento meccanico e dei modi di cedimento dei materiali e dei rivestimenti è sicuramente rappresentato dalla presenza di tensioni residue conseguenti al processo produttivo, e da come queste sono influenzate e/o correlate con la microstruttura.

Gli stress residui sono indotti usualmente dalle fasi di lavorazione o produzione dei materaili o dei componenti e molto spesso gli stress residui sono il fenomeno principale che limita le prestazioni in esercizio, come ad esempio, le tensioni residue di trazione che insorgono in corrispondenza di cordoli di saldatura.

A tal proposito, si ricorda che le tecniche di valutazione degli stress residui possono essere classificate in (a) tecniche non distruttive, come diffrazione di neutroni o ai raggi X e spettroscopia Raman, e (b) tecniche distruttive e semidistruttive, che consistono nella rimozione controllata di materiale e nella misura delle deformazioni di rilassamento conseguenti.

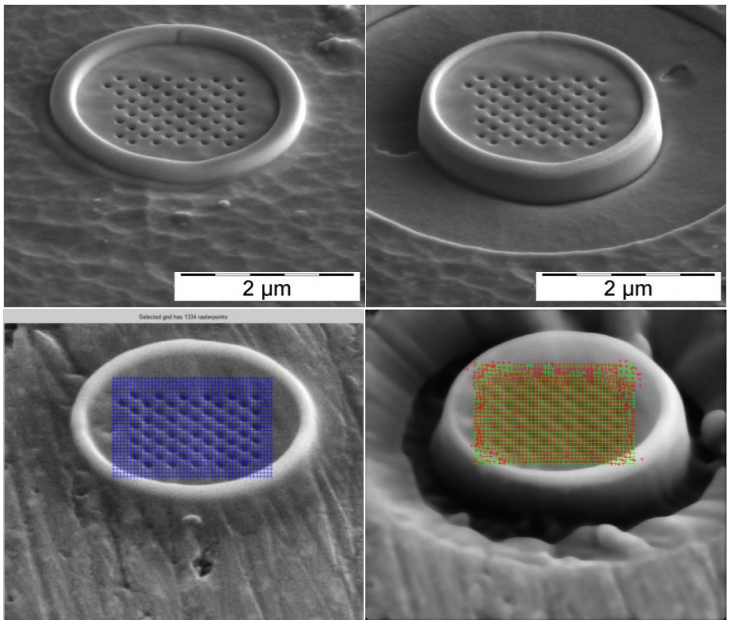
Tuttavia, i metodi tradizionali XRD per la valutazione degli stress residui sono limitati in termini di risoluzione spaziale a qualche frazione di millimetro, e sono quindi poco adatti all'analisi, ad esempio, di stress integranulari in materiali policristallini aventi dimensioni del grano dell'ordine del micrometro.

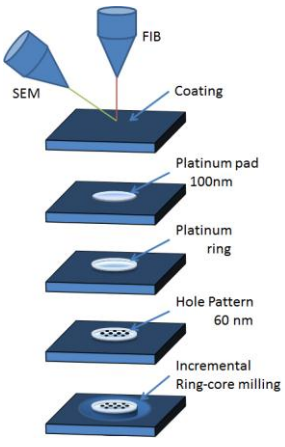
Lo studio delle tensioni residue in schiume metalliche richiede lo sviluppo di tecniche di misura non convenzionali, innovative e ad alta risoluzione, che siano caratterizzate, allo stesso tempo, da una risoluzione spaziale ed accuratezza di posizionamento sub-micrometriche e da una accessibilità all'industria in termini di costi e facilità d'uso.

A tal fine, nel progetto è stato proposto di utilizzare una tecnica innovativa, recentemente sviluppata presso l'Università di Roma Tre (Materials Science and Engineering A 528 (2011) 7901– 7908), basata sulla rimozione controllata di materiale di uno scasso di dimensioni micrometriche di forma anulare, realizzata tramite microscopia a fascio ionico focalizzato (FIB). L'analisi delle deformazioni di rilassamento è effettuata tramite correlazione digitale di immagine (DIC) a seguito della realizzazione di immagini SEM ad alta risoluzione.

Gli stress residui (sia il valor medio che, ove necessario, il profilo nello spessore scavato) sono infine calcolati a partire dalle deformazioni di rilassamento misurate tramite modelli costitutivi analitici o tecniche di simulazione agli elementi finiti (FEM).

Uno schema del metodo è riportato nella seguenti figure (in cui i dati riportati sono esemplificativi e si riferiscono ad un rivestimento in nitruro di cromo, CrN, su acciaio per applicazioni in utensileria).





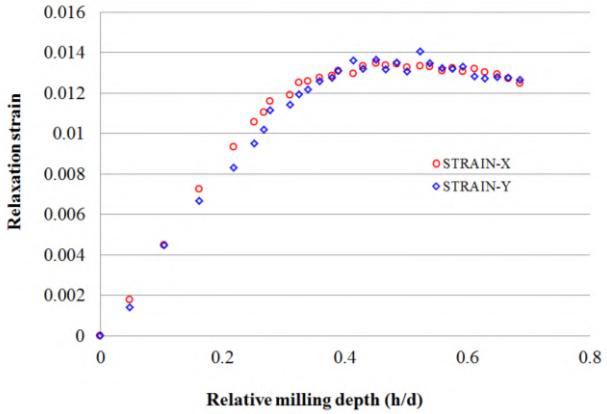


Figura 454. Schema del metodo: realizzazione degli scassi colonnari con FIB, analisi delle deformazioni mediante Digital Image Correlation, Calcolo FEM del profilo di tensione lungo lo spessore

La tecnica garantisce una risoluzione dell'ordine del micron (µm) nelle tre direzioni spaziali, e quindi può permettere in questo caso di effettuare misure locali di stress sulle varie fasi costituenti la schiuma.

Tale misura è assolutamente unica a livello internazionale e potrà permettere di sviluppare modelli di correlazione tra stress residuo e comportamento in esercizio, assolutamente innovativi dal punto di vista scientifico e di rilevanza strategica dal punto di vista progettuale.

La tecnica è stata applicata a campioni di pannelli AFS preparati da ENEA in due condizioni differenti per valutare l'influenza di trattamenti termici sul livello di stress interno della matrice di alluminio e nelle isole di componenti intermetallici tipici delle schiume di alluminio eutettiche.

- Campione #1760: campione solo lucidato dopo produzione e, successivamente alla prima sessione di misure di stress, trattato termicamente;
- Campione #1762: Campione trattato termicamente dopo produzione, lucidato e infine sottoposto a nuovo trattamento termico.

Nel trattamento termico i campioni sono mantenuti a 345 °C per 10 minuti e poi raffreddamento in forno.

La Tabella 90 riporta la sintesi delle deformazioni di rilassamento e degli stress residui misurati sui campioni e sulle singole fasi.

Tabella 90. Sintesi dei risultati di misura di stress residuo sulle singole fasi costituenti le pareti delle celle

	MATRIX	MATRIX	SECONDARY PHASE	SECONDARY PHASE
Sample	relaxation strain at h/d=0,45	σ_R (MPa)	relaxation strain at h/d=0,45	σ_R (MPa)
1760-TQ	0,001987	-207,4	0,004894	-1098,1
1760-TT	-0,000089	9,3	0,002588	-580,7
1762	0,000257	-26,9	0,001118	-250,8

N.B. gli stress residui sono calcolati a partire dalle deformazioni di rilassamento utillizzando la procedura agli elementi finiti descritta in dettaglio nel secondo capitole del Report RdS/2021/100

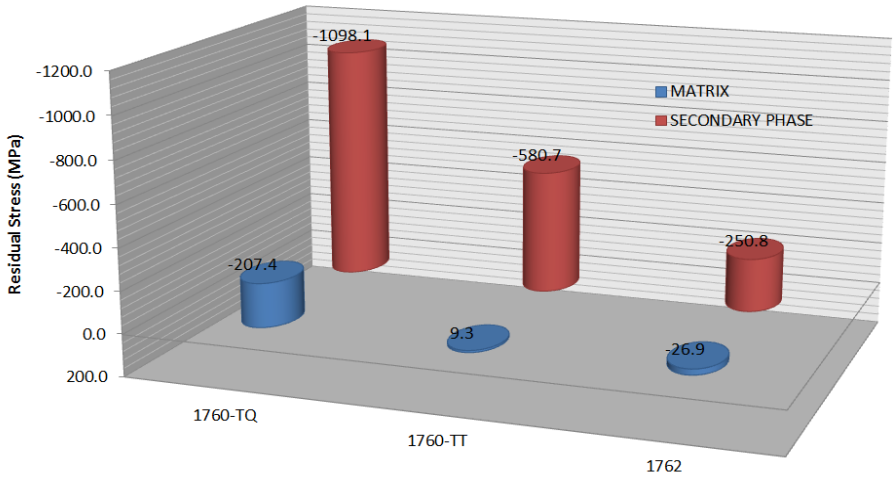


Figura 455. Stato tensionale dei differenti campioni nella matrice e nella fase secondaria in funzione del trattamento subito

L'analisi sub micrometrica degli stress residui ha portato alle seguenti conclusioni:

1. Per tutti i campioni analizzati, la fase secondaria, quella a maggiore durezza, ha mostrato stress residui di compressione (deformazioni di rilassamento positive), significativamente superiori, in valore assoluto, agli stress presenti nella matrice.
2. Nel caso del campione 1760 (solo lucidato), sono stati misurati significativi stress residui di compressione anche all'interno della matrice metallica;
3. Lo stress di compressione nella matrice per il campione 1760 è tuttavia imputabile all'incrudimento superficiale indotto dal processo di preparativa metallografica; tale valore di stress è infatti dello stesso ordine di grandezza del carico di snervamento atteso per tale materiale;
4. A conferma di ciò, il medesimo campione 1760 dopo trattamento termico mostra delle tensioni residue trascurabili all'interno della matrice, mentre si mantiene un significativo stato tensionale di compressione all'interno della seconda fase, che è ridotto rispetto al campione tal quale, probabilmente a causa di meccanismi di rilassamento conseguenti all'innesco di processi diffusivi;

5. Anche nel caso del campione 1762, lo stress residuo nella matrice metallica è praticamente nullo (ovvero inferiore a quelli che sono i margini di errore attesi per la tecnica), mentre si mantiene la compressione sulla fase secondaria;
6. L'insorgere dello stato di stress di compressione all'interno di tale fase, può essere spiegato tramite una serie di meccanismi:

    - Stress dovuti a contrazione termica differenziale nel corso del raffreddamento susseguente all'espansione: la natura intermetallica conferisce alle fasi secondarie in leghe di alluminio un coefficiente di espansione termica sicuramente inferiore rispetto alla matrice metallica, e che quindi comporta una deformazione residua di compressione sulla fase secondaria, data in prima approssimazione dalla seguente equazione:

      $$\varepsilon_{x=}\varepsilon_{Y}=(\alpha_1-\alpha_2)(T-T_{ref})$$

      dove α_1 ed α_2 sono i coefficienti di espansione termica (CTE) delle due fasi, e Tref è la temperatura alla quale si assume che il sistema sia privo di stress (che in questo caso è la temperatura all'inizio della fase di raffreddamento finale, subito dopo l'espansione).

      È notevole come, ipotizzando un salto termico pari a 500 °C ed una (approssimativa, ma realistica) differenza in termini di CTE pari a $5\cdot10^{-6}$ °C^{-1} tra le due fasi, si ottenga un valore di deformazione residua attesa pari a $2.5\cdot10^{-3}$, valore prossimo a quanto stimato per il campione 1760-TT (in cui sono stati probabilmente eliminati gli stress aggiuntivi dovuti alla lucidatura meccanica). Il valore delle tensioni misurato sul campione 1760-TT sembra quindi dare una rappresentazione fedele del reale stato di stress sulla fase secondaria a seguito della produzione.

    - Stress dovuti a distorsione reticolare all'interno della fase secondaria. Andando ad osservare il diagramma di stato Al-Cu, si nota come il composto Al_2Cu (è) sia caratterizzato da un certo intervallo di miscibilità. Ciò potrebbe comportare un eccesso (o difetto) di atomi di Rame (o Alluminio) rispetto alla configurazione stechiometrica, che potrebbero indurre un certo livello di distorsione reticolare, a sua volta associabile ad una ulteriore componente di tensione residua di compressione, specialmente nel caso di un rapidissimo raffreddamento dalla temperatura di espansione della schiuma.

7. Le analisi sul campione 1760-TT e sul campione 1762 confermano come lo stato di stress presente all'interno della matrice, e lontano dai grani di fase secondaria, sia relativamente basso.
8. Tuttavia, uno stato di deformazione residua di trazione nella matrice dovrà essere necessariamente presente (per motivi di equilibrio) in corrispondenza della interfaccia con la fase secondaria.

In conclusione, è stato quantitativamente osservato come all'interno della parete delle celle esistano dei gradienti di stress residuo significativi, che sono essenzialmente correlabili alla distribuzione delle fasi, essendo le fasi secondarie caratterizzate da significativi stress di compressione.

Tali gradienti localizzati di stress possono anche essere con-causa dell'innesco di cedimenti localizzati sotto l'azione di una sollecitazione meccanica macroscopica, in particolare se si vengono a verificare in corrispondenza di altre difettosità caratteristiche della schiuma (e.g. micro-porosità).

La gestione della dimensione e distribuzione della fase secondaria dura è quindi fondamentale ai fini del controllo della distribuzione dello stress residuo e, conseguentemente, dei modi di cedimento in esercizio della schiuma.

Modellazione FEM per il calcolo dei micro-stress sulle pareti delle celle

Il calcolo delle tensioni residue a partire dalle prove FIB-DIC di rilassamento (Incremental micro-scale ring-core method) ha richiesto lo sviluppo di uno specifico modello agli elementi finiti.

L'obiettivo del modello è stato quello di calcolare la componente media dello stress residuo a partire dalle deformazioni misurate (capitoli precedenti).

La necessità dello sviluppo di modelli numerici nasce dalla particolare geometria utilizzata (scasso anulare), che comporta un rilassamento parziale delle tensioni residue e quindi una correlazione tensione-deformazione non immediatamente ricavabile.

A questo fine, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti, utilizzando il software commerciale ANSYS 9.0, che simula la rimozione di un volume toroidale da una superficie in cui sia stato preliminarmente applicato uno stato di stress residuo noto.

Informazioni e dettagli su questa attività di modellazione FEM si rimanda al Report RdS/2012/100.

Sviluppo di procedure di correlazione digitale di immagine (DIC) e analisi dei dati per lo studio dei meccanismi di cedimento dei pannelli

Il metodo della correlazione digitale di immagine (Digital Image Correlation method) ha mostrato un rapido sviluppo nelle ultime due decadi, a causa del significativo aumento della disponibilità di sistemi digitali per la realizzazione di immagini ad alta risoluzione, alle varie scale dimensionali (dal nano al macro).

La procedura è stata implementata presso l'Università di Roma TRE e successivamente trasferita ad ENEA, come previsto nel progetto.

La tecnica illustrata nei dettagli nel rapporto RdS/2012/100 consente di ottenere la distribuzione 2D della deformazione per tutte le immagini realizzate (che nel caso della prova in studio era pari a 122), e garantisce quindi una mole di dati estremamente significativa per l'analisi dettagliata dei fenomeni di cedimento del pannello.

Il metodo implementato sulle immagini realizzate da ENEA durante svariati test, e successivamente utilizzato da ENEA anche in test di compressione, permette di comprendere in modo più accurato i meccanismi di frattura dei materiali in esame.

Correlazione tra le misure di stress residuo ed il comportamento macroscopico osservato

Le due attività che sono state sviluppate nel corso dell'annualità hanno portato ad un avanzamento significativo sulle conoscenze relative al comportamento meccanico delle schiume in esame, che possono essere così sintetizzati:

- l'analisi locale ad alta risoluzione degli stress residui ha mostrato come esistano sicuramente dei gradienti di stress all'interno delle pareti di ogni singola cella, che possono essere solo ridotti (ma non eliminati) tramite la realizzazione di trattamenti termici di distensione. Tale campo di stress consiste essenzialmente in stati tensionali di compressione all'interno di grani di fase secondaria e di debole trazione all'interno della matrice;
- i meccanismi di cedimento nel corso si prove di flessione e compressione macroscopica sono essenzialmente caratterizzati dall'innesco (nelle fasi iniziali della prova) di micro-fessurazioni localizzate a livello della singola parete. Lo sviluppo delle tecnologie DIC per l'analisi localizzata delle deformazioni nel corso della prova ha permesso di identificare in modo estremamente accurato tali cedimenti

Tali informazioni sono fondamentali per la comprensione approfondita del comportamento meccanico di queste strutture e sono intrinsecamente correlati. Difatti, il cedimento localizzato in tali materiali può essere immaginato come una funzione complessa di:

1. durezza e modulo elastico intrinseci delle fasi costituenti la schiuma (analizzati nel dettaglio nel corso della prima annualità del presente progetto);
2. coefficiente di incrudimento della matrice metallica;
3. stato di tensione residua della schiuma (in particolare: gradienti di stress)
4. presenza di micro-difettosità, quali cricche e porosità.

Lo studio della distribuzione degli stress residui suggerisce quindi come la presenza di grani grossolani di fase secondaria possa essere non raccomandabile ai fini della ottimizzazione del comportamento meccanico macroscopico dei pannelli, in quanto tale distribuzione delle fasi produrrebbe eccessivi gradienti di tensione residua e potrebbe essere causa di punti di innesco di frattura. È notevole il fatto che la presenza di grani grossolani di fase secondaria è spesso identificata nelle zone di interfaccia tra la pelle ed il core dei pannelli, a seguito di parziale ricottura localizzata della schiuma nel corso del processo di giunzione pelle-core.

I risultati ottenuti del lavoro suggeriscono quindi, in modo univoco, come eventuali trattamenti termici sulle schiume debbano essere mirati all'ottenimento di una dispersione fine delle fasi secondarie, in particolare in corrispondenza delle giunzioni pelle-core.

Tale microstruttura, ottenibile con trattamenti termici specifici a seconda del tipo di materiale, comporterebbe anche il necessario aumento della durezza media ed una ottimizzazione del coefficiente di incrudimento.

Il controllo della microstruttura all'interfaccia tra la pelle ed il core risulta un ulteriore elemento di fondamentale importanza, essendo anch'esso direttamente correlabile allo stato di stress residuo ed alle proprietà meccaniche intrinseche delle pareti delle celle.

E.2 Sviluppo di metodologie di controllo NDT su componenti saldati e correlazione con le caratteristiche meccaniche

Questo sotto obiettivo riguarda lo sviluppo di metodologie per il controllo non distruttivo di Pannelli AFS sia tal quali sia di giunzioni saldate fra ADS o ADF e strutture principali in estrusi di alluminio [Report/2012/101]. Il lavoro è stato realizzato applicando tecnologie di controllo relativamente tradizionali, ben note anche nelle realtà della piccola e media impresa ovvero RX (controlli radiografici e controlli ultrasonori).

Lo scopo di queste analisi è essenzialmente quello di valutare la densità della *core* dei pannelli. Infatti la variazione di densità fornisce una misura dell'omogeneità interna del materiale e del maggiore o minore numero di sezioni resistenti. Le dimensioni dei campioni analizzati sono: 400x100x30 mm (secondo lo schema di Figura 456).

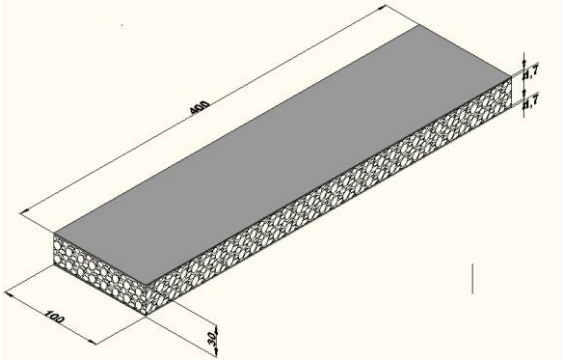


Figura 456. Schema di campioni sottoposti ad esami non distruttivi

Con queste tecniche ci sono comunque dei limiti sulla possibilità di individuare tutti i possibili difetti. In particolare, quello più "subdolo" da individuare è la scollatura parallela alla pelle che non ho modo di evidenziare (Figura 457).

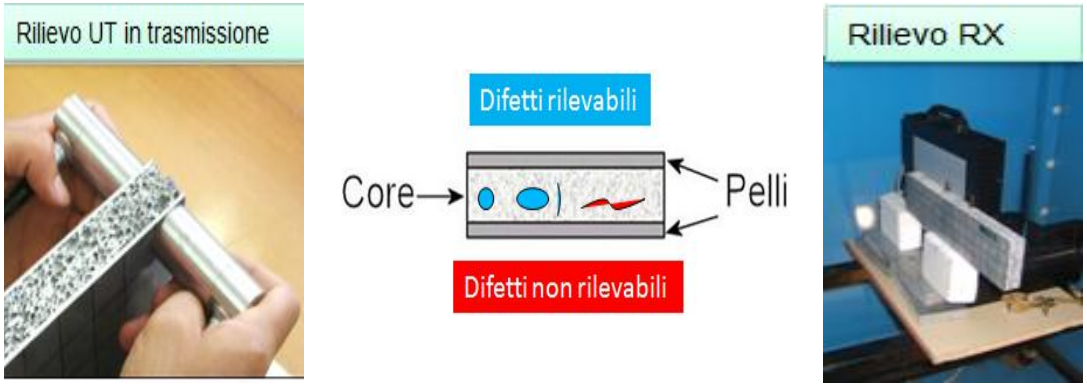


Figura 457. Difetti individuabili con tecnica Ultrasonora e Radiografica

Per il controllo dei campioni con gli ultrasuoni, normalmente si utilizzano due diverse tecniche:

- riflessione (Pulse Echo=PE): la sonda trasmette e riceve l'onda ultrasonora. Il componente è controllato solo da un lato. La presenza di una discontinuità è rilevata dall'ampiezza del segnale elettrico ed è possibile determinarne: grandezza, profondità e inclinazione.
- trasmissione (True-Trasmission=TT): consiste in una sonda trasmittente ed una ricevente, il componente è posto tra le due sonde. L'onda ultrasonora, trasmessa dalla prima sonda, attraversa il componente ed è ricevuta dalla sonda ricevente; la presenza di una discontinuità è rilevata dall'attenuazione del segnale elettrico.

La prima tecnica, necessita di una elaborazione successiva ed è utilizzata su componenti omogenei spesso metalli e compositi di spessore contenuto in quanto l'onda UT attraversa il materiale 2 volte.

La seconda tecnica, quella da noi presa in considerazione, è più semplice ed immediata ed è utilizzata su componenti con elevato assorbimento e disomogenei (Nido d'ape o Honeycomb, Sandwich, composito) in quanto lo spessore è attraversato una sola volta e spesso le superfici non sono parallele.

Per ogni campione (Figura 458) di pannello AFS è stata eseguita una campionatura di 4 x 16 misure UT per stimare la velocità del suono nel materiale. Lo strumento ultrasonoro utilizzato è a bassa frequenza modello USM 23 Krautkramer portatile con sonde di frequenza 50 KHz e diametro cristallo ½" (Figura 459).

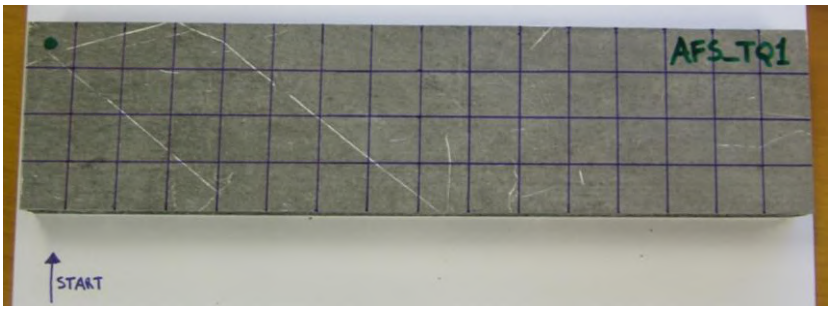


Figura 458. Griglia di campionatura sul pannello AFS

Figura 459. Tecnica TT – Schiuma metallica in alluminio – il componente è tra le due sonde

È stato utilizzato un software sviluppato da ENEA che mostra i valori di velocità del suono sotto forma di:

- valori numerici
- mappa in falsi colori
- mappa tridimensionale
- istogramma di distribuzione delle velocità-

Questo permette di comparare i campioni tra di loro ed estrarre degli indici di distribuzione e dimensione dei pori nella schiuma all'interno dei pannelli AFS.

Gli stessi campioni, sia tal quale sia saldati, sono stati analizzati anche con radiografia digitale. La tecnica radiografica utilizza una macchina a potenziale costante, fuoco da 2 mm e un pannello digitale a stato solido. L'immagine radiografica viene convertita in una immagine bitmap di risoluzione 512 x 512. Nelle Tabelle 91 e 92 sono riportate le caratteristiche principali dell'impianto utilizzato e i parametri utilizzati per radiografare i pannelli AFS.

Tabella 91. caratteristiche principali dell'impianto utilizzato

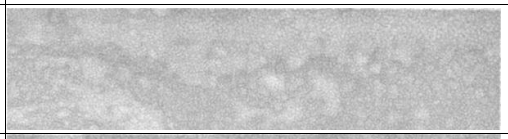
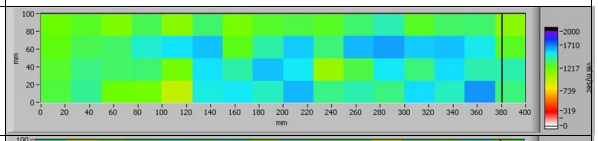
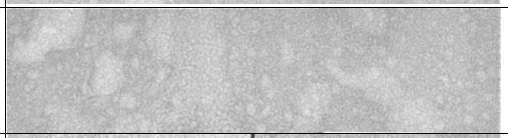
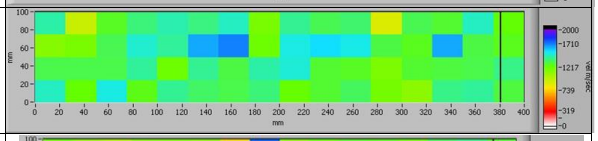
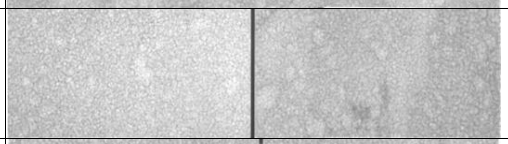
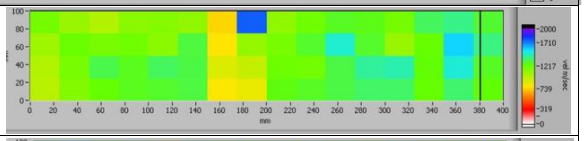
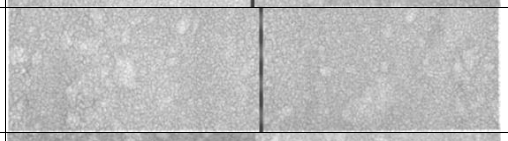
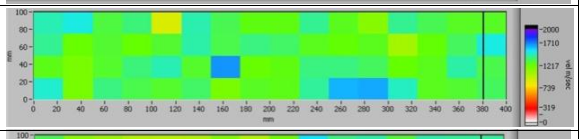
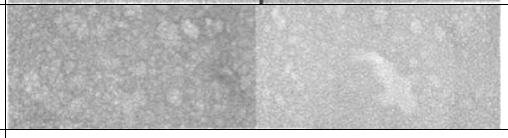
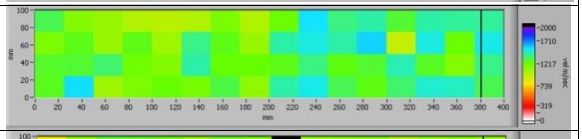
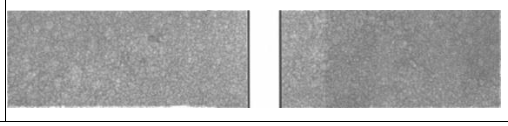
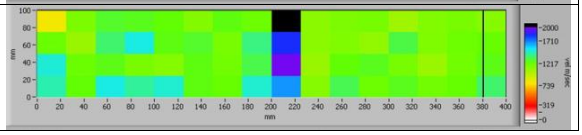
Equipment	Seifert ISOVOLT TITAN 160 M2 0.4-1.5	Max. Tube Voltage (kV)	160
Tube Current (mA)	10	Focal Spot Size EN 12 543 (mm)	3,00
Detector	PerkinElmer	XRD 840 BE13	512x512 16 bit

Tabella 92. Parametri radiografici per AFS

Spessore	kV	mA	Media	Distanza mm
30 mm	73	2	100	960

In Tabella 93 sono riportate le rappresentazioni grafiche sia per l'analisi radiografica sia per i test UT in mappe di colori.

Tabella 93. Riepilogo analisi NDT su campioni di AFS tal quali e saldati con EBW e LBW

ID	Esame RX	Esame Ultrasuoni
AFS TQ1		
AFS TQ2		
BEBW_IL S1		
BEBW_IL S1L		
BEBW_L S1		
BEBW_Q LS1		

L'analisi radiografica mostra immediatamente la natura non omogenea i pannelli AFS con zone scure con maggiore densità e zone chiare con densità minore. In alcuni campioni queste zone sono ben concentrate. La discretizzazione UT introduce necessariamente degli artefatti in particolare nei in corrispondenza dei giunti saldati. I colori più scuri corrispondono a maggiore densità ma nel caso del campione saldato con inserto quadro la dimensione della sonda è troppo ampia indicendo una fascia centrale che non permette di fornire indicazioni. Anche l'analisi della qualità della saldatura è difficoltosa permettendo di evidenziare solo con la tecnica RX eventuali cricche o macroporosità.

I campioni sono stati suddivisi in due porzioni come in Figura 460 e sottoposti a test di flessione.

Figura 460. Estrazione dei campioni per qualifica meccanica dopo caratterizzazione NDT

E' stato molto interessante osservare una certa correlazione fra i punti di frattura delle prove a flessione con le prove NDT in particolare l'analisi radiografica. A titolo di esempio si riporta la correlazione sul campione saldato EBW a bassa velocità LS.

Il campione di saldatura LS, senza inserto, è stato ottenuto con direzione di saldatura parallela al verso di laminazione e successivamente il campione standard 100 mm x 400 mm è stato suddiviso in due parti uguali identificati con LS1A ed LS1B.

Il risultati delle prove a flessione mostrati nella Figura 461 sono simili nell'andamento ma hanno performance in termini di tensione massima notevolmente differenti. Il provino LS1A mostra infatti una σ_{max} di circa 104,8 MPa contro gli 86,8 MPa del provino LS1B.

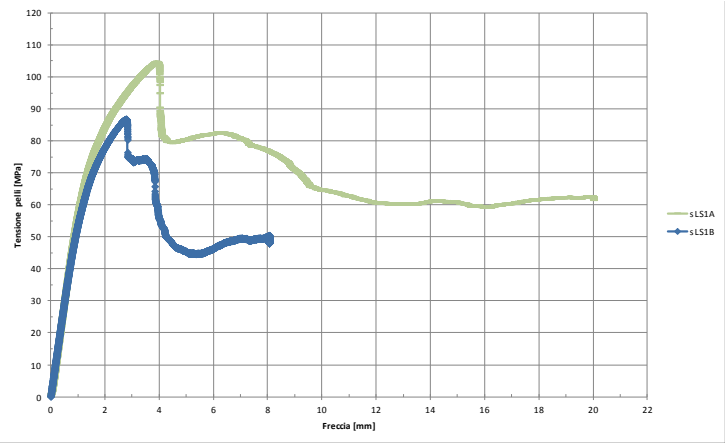
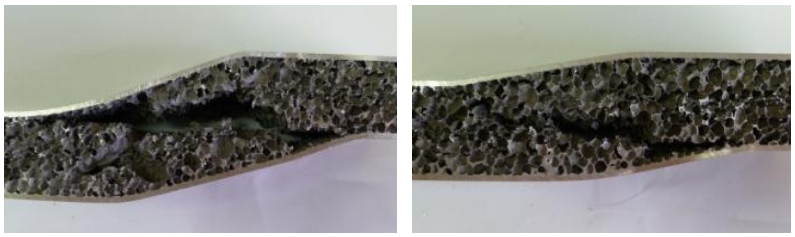


Figura 461. Tensione nelle pelli rispetto alla freccia del campione LS1 saldato al F.E.

La rottura è avvenuta per entrambi i provini nel core del materiale base sullo stesso lato (Figura 462), la differenza nel valore massimo può essere giustificata osservando la RX riportata per migliore chiarezza in Figura 463.



LS1A LS1B

Figura 462. Vista della frattura nei campioni flessionali LS1A/B

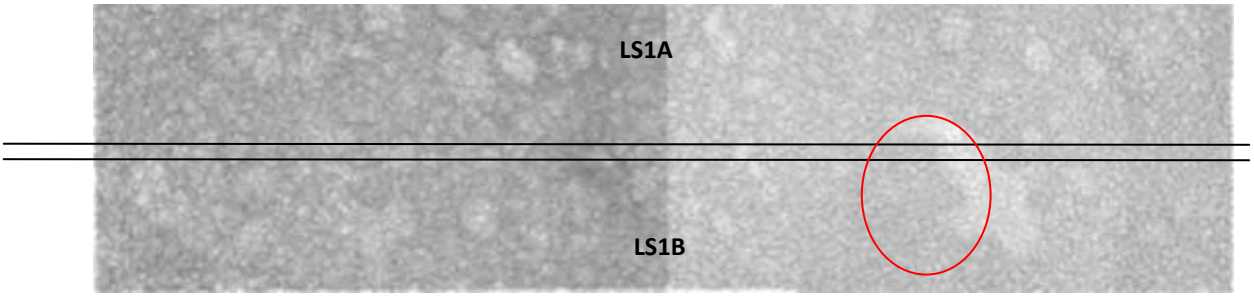


Figura 463. Radiografia digitale del campione LS1 da cui si sono ricavati i provini LS1A e LS1B

Come è facile osservare sono stati accoppiati due campioni solo apparentemente uguali. Il campione di destra presenta una densità certamente inferiore a quello di sinistra (la radiografia digitale infatti mostra i colori chiari come più vuoti a differenza delle tradizionali lastre radiografiche). Inoltre, è evidenziato nell'ovale in rosso una zona singolare in cui la densità è ancora più ridotta, tale zona dopo la suddivisione del campione ricade per la maggior parte nel provino LS1B che ha infatti mostrato una minore resistenza. C'è da evidenziare come tuttavia la resistenza raggiunta sia in linea con i valori medi di 83,6 MPa mostrati dai campioni tal quali.

La correlazione fra densità radiografica e resistenza meccanica è stata riscontrata ripetutamente, anche nell'analisi di prove a compressione di campioni preventivamente radiografati. Per approfondimenti di rimanda al rapporto tecnico completo.

In conclusione**,** il lavoro ha permesso di trovare una certa correlazione tra i risultati degli esami non distruttivi (con tecnica ultrasonora e radiografica) e i risultati delle prove meccaniche distruttive (flessione e compressione): l'elemento debole di tali pannelli , almeno in prove statiche, risulta essere il core del pannello in schiuma di alluminio.

In particolare, le prove meccaniche di flessione hanno mostrato come la rottura è avvenuta nel *core* che cede a taglio, nella maggior parte dei casi, in corrispondenza di "difetti" intesi come zone di coalescenza di bolle e bande di collasso delle stesse nelle aree in cui tale schiuma risulta avere minor densità. I risultati migliori in assoluto in termini di performance sono realizzati da i campioni che hanno mostrato una maggiore densità.

Per quanto riguarda, invece, l'analisi delle curve di compressione si evince che tutti i campioni, eccetto quello 03_3(t), risultano avere lo stesso comportamento, il campione 03_3(t) infatti offre una maggiore resistenza in quanto risulta avere una maggiore densità rilevata sia radiograficamente che mediante pesatura del campione.

Possiamo inoltre affermare che gli esami radiografici sembrano quelli che meglio mettono in evidenza uno dei limiti dei pannelli AFS, ossia una distribuzione molto disomogenea dei pori e della loro dimensione a dimostrazione che l'aspetto più critico e che deve essere ancora migliorato, è il controllo di tutti i parametri che entrano in gioco durante il processo di schiumatura del *core* (temperatura del forno, tempo di permanenza, velocità di raffreddamento, tipo di agente schiumante).

Il limite della tecnica radiografica è che non si riescono ad evidenziare difetti piani ortogonali alla direzione del fascio dei raggi X (es. scollature delle pelli). Quindi l'analisi ha certamente bisogno di un maggior approfondimento, inoltre è auspicabile che per applicazioni critiche il controllo oltre che con tecniche tradizionali si rivolga verso tecniche specifiche per i materiali compositi come la Shearografia.

E.3 Fabbricazione e qualificazione di componenti saldati e progettazione di componenti in AFS

Le attività di questo sub obiettivo riguardano l'ottimizzazione di processi di saldatura laser-arco individuato come possibile tecnica di saldatura per componenti di grande dimensione [Report RdS/2012/102].

La valutazione delle caratteristiche meccaniche, in termini di prove di compressione e prove di flessione, sul materiali tal quale e sui giunti saldati di campioni di AFS, con lo scopo di valutare oltre alla resistenza ultima a schiacciamento ed a flessione anche i moduli caratteristici (E, G, v) utili per la progettazione con questa nuova classe di materiali. Infine, l'analisi di un "case study" effettuato con la collaborazione del consorzio CALEF, in cui è stato scelto e successivamente riprogettato un componente, il pavimento flottante delle carrozze ferroviarie, per valutare quali vantaggi possono essere conseguiti dall'impiego dei pannelli AFS.

Ottimizzazione dei sistemi di saldatura Laser - TIG-Filo

I test meccanici sui campioni di saldatura EBW realizzati nella prima annualità hanno chiaramente mostrato come la saldatura Electron Beam Welding rappresenta certamente un benchmark di riferimento per la saldatura degli AFS. Tuttavia, dal punto di vista industriale la principale tecnologia candidata per applicazioni estensive di saldatura di AFS è la saldatura laser. Un'ottimizzazione preliminare dei parametri di saldatura è stata effettuata nel corso del PAR 2008-2009 con la realizzazione di un campione di qualifica saldato Laser TIG che ha fornito indicazioni contrastanti durante le qualifiche meccaniche condotte nella presente annualità. In particolare, la saldatura senza materiale d'apporto di leghe della serie 6xxx, come le pelli dei pannelli AFS può portare in caso di saldatura con elevato grado di vincolo alla criccatura del giunto e questo per i pannelli AFS può accadere non tanto nella saldatura della prima pelle saldata quanto nella saldatura della seconda pelle del pannello, in quanto, seppur limitata, c'è la tendenza ad avere contrazione angolare con conseguente formazione di gap a cui viene associato un componente già vincolato dalla prima giunzione. Questo, come già verificato, può portare ad una riduzione locale della sezione resistente oltre che ad una certa tendenza alla criccatura.

In precedenza erano stati evidenziati i benefici ottenibili con l'accoppiamento del filo alla saldatura Laser TIG realizzati su campioni di dimensione limitata in quanto, la testa con torcia manuale provvisoriamente utilizzata, non garantiva adeguata robustezza alla testa di saldatura per la giunzione Laser Tig Filo dei campioni di qualifica per test flessionali di dimensione 400x 100 mm.

Nel corso di questa annualità è stata realizzata una versione industriale della testa di saldatura laser TIG Filo (Figura 464). I test di funzionamento sono stati realizzati sia fra AFS sia con inserti. Mentre i primi test hanno di fatto confermato anche con questa nuova torcia i parametri di saldatura dello scorso anno, per la saldatura con inserti i parametri hanno subito una variazione in termini di corrente TIG e velocità di Filo senza però riuscire a dare risultati soddisfacenti in termini di penetrazione sull'inserto centrali mostrando tutti i limiti di una sorgente laser di bassa potenza nella saldatura delle leghe di alluminio con spessore superiore a 2mm.

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto RdS/2012/102.

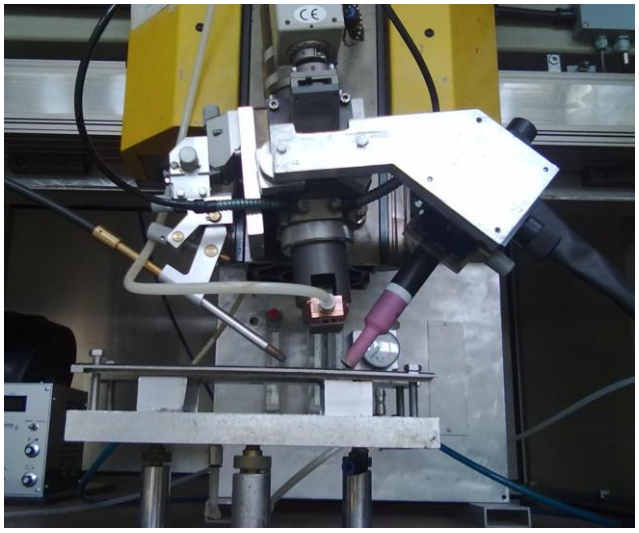


Figura 464. Nuovo Set Up di saldatura Laser TIG Filo (LTW) con staffa a rigidità migliorata e torcia per saldatura automatica

In Figura 465 i campioni di qualifica Laser TIG Filo senza e con inserto.

Figura 465. Campioni sottoposti a saldatura senza inserto (alto) con inserto (basso)

Qualificazione dei pannelli AFS e determinazione dei parametri di progetto

Nella prima annualità (PAR 2008-2009) è sta sviluppata e testata l'apparecchiatura per la qualificazione di pannelli sandwich AFS in accordo alla normativa di riferimento ASTM C393. Nel corso di questo annualità sono state caratterizzati sia i materiali tal quali sia i giunti saldati applicando alla prova anche le tecniche di acquisizione delle immagini e la successiva analisi DIC sia ai test di flessione sia ai test di compressione effettuati per la determinazione del modulo di elasticità.

La ASTM C393 applica la semplice teoria della trave per determinare i parametri di prova, tuttavia gli AFS sono materiali suscettibili allo schiacciamento localizzato che può portare a falsare i risultati. Per tale motivo è stata effettuata una simulazione mediante codice CAST3M che ha validato l'applicazione della norma sui panelli oggetto della caratterizzazione.

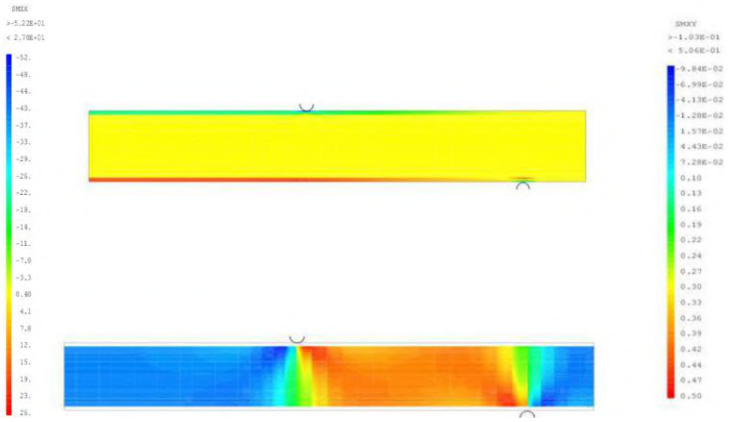


Figura 466. Analisi agli elementi finiti, sollecitazione normale (SMXX) e tangenziale (SMXY)

Le prove sono state effettuate sul materiale tal quale sia in direzione di laminazione sia in direzione ortogonale alla laminazione in quanto come noto in letteratura si hanno comportamenti differenti.

Le prove sugli AFS tal quali si sono svolte con campioni delle dimensioni 400 x 40 x 30 mm. La Figura 468 mostra il tipico comportamento a flessione di un pannello (provino TQ2B) la cui curva carico – spostamento mostra quattro zone caratteristiche:

- fase iniziale lineare (elastica) fino al punto (1).
- Prima deviazione dalla proporzionalità: il carico continua a crescere con andamento circa lineare ma con una pendenza minore; l'eventuale scarico procede con pendenza prossima a quella del tratto iniziale.
- Nel punto (2) si registra il massimo valore della forza che decresce poi rapidamente: nella schiuma si evidenzia un'estesa frattura nella zona tra il punzone e l'appoggio di sinistra (zona in cui si ha il taglio).
- Ricordando che la prova si svolge in controllo di deformazione (freccia), nell'intorno del punto (3) il sandwich conserva una rigidezza residua che decresce però rapidamente a seguito dell'apertura della frattura; la deformazione è ora concentrata essenzialmente nella zona danneggiata, mentre la parte centrale in cui la sollecitazione è principalmente di flessione pura recupera parte della deformazione precedentemente impressa.
- La prova si conclude in (4): è evidente la frattura nel *core* che ha causato a sinistra un caratteristico meccanismo di deformazione con la creazione di cerniere plastiche nelle pelli in corrispondenza dell'appoggio e del punzone.

Di seguito viene riportato il grafico complessivo di tutte le prove effettuate su materiale tal quale (Figura 468). Tutti i campioni esaminati si sono rotti a taglio per cedimento della schiuma (core).

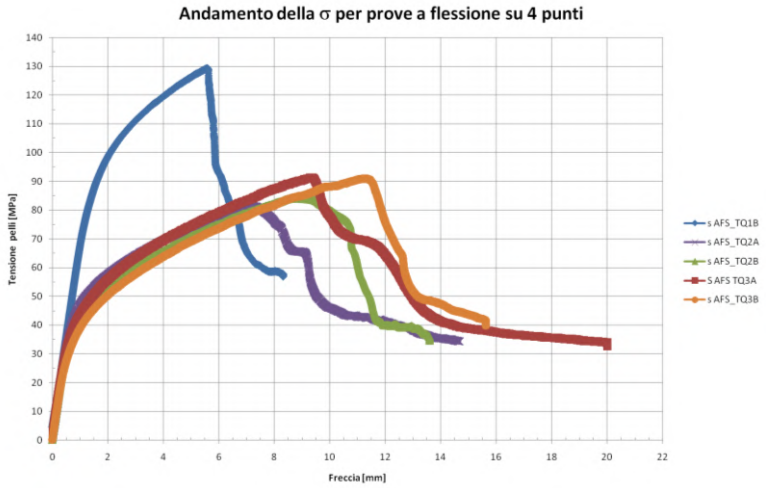


Figura 467. Prove a flessione su 4 punti di campioni AFS Tal quali: grafico delle tensioni nelle pelli

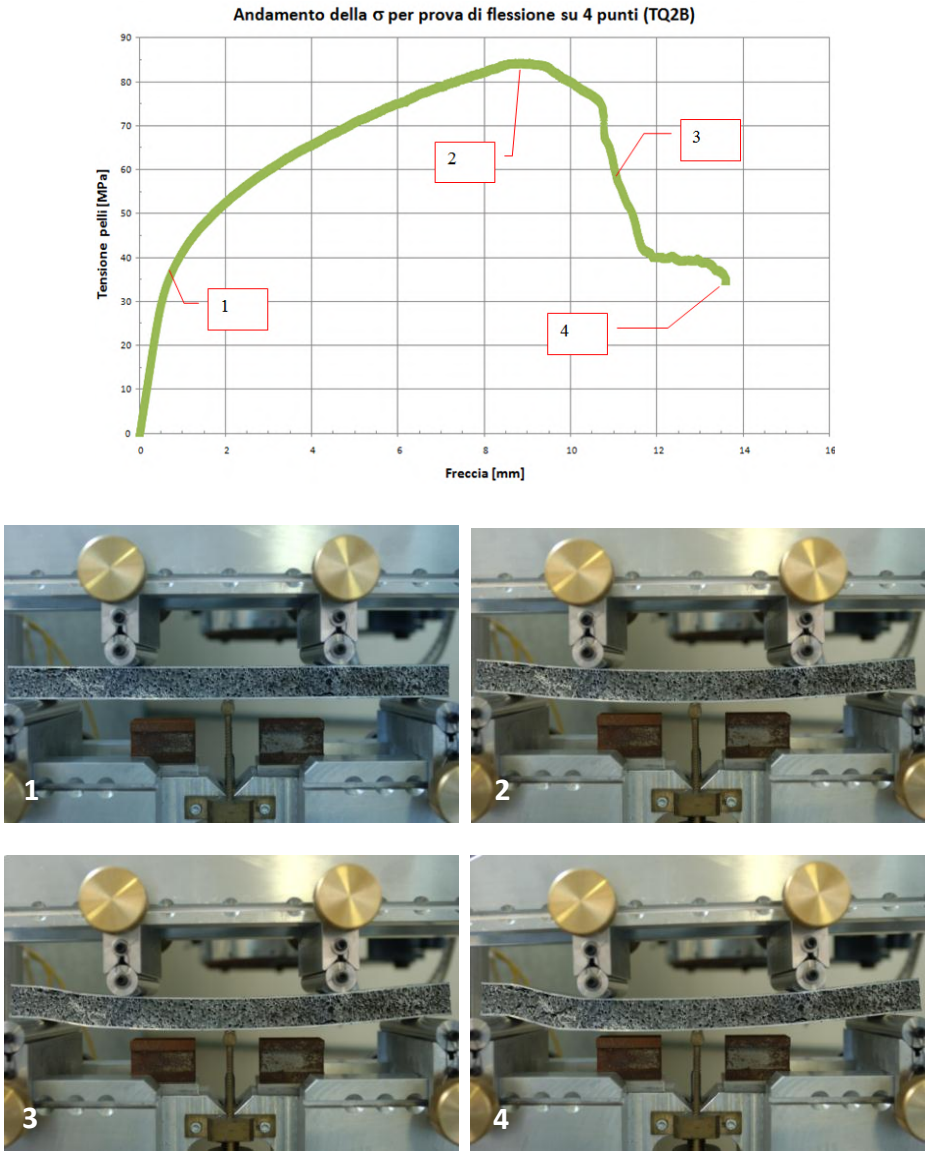


Figura 468. Grafico della curva di tensione nelle pelli vs. freccia relative al campione TQ2B ed immagini del campione relative alle varie fasi durante la prova di flessione relative ai differenti tratti della curva di sollecitazione

Inoltre si osserva che, mentre i test relativi ai campioni TQ2 e TQ3, che hanno il lato maggiore perpendicolare alla direzione di laminazione, presentano andamento similare e valori di tensione massima compresi fra 82e 92 MPa, il campione TQ1, il cui lato maggiore è parallelo alla direzione di laminazione, presenta un andamento della curva tensione - freccia molto differente raggiungendo valori di tensione molto più alti (circa 130 MPa).

Le prove di flessione sono state effettuate in zona elastica sia nella configurazione a 3 punti sia nella configurazione a 4 punti per la determinazione dei parametri di rigidezza.

I valori determinati sono un modulo di elasticità tangenziale della schiuma G≈350 MPa cui a sua volta corrisponde a un modulo elastico E=8/3 G≈ 925 MPa, valore realistico per questi materiali, per i quali si considera un coefficiente di Poisson pari a 1/3.

I pannelli sono stati sottoposti anche a prove di compressione per determinarne il modulo di elasticità e la resistenza. Il modulo elastico determinato nello scarico del primo ciclo di carico è pari a 770 MPa mentre la resistenza a compressione e di circa 4 MPa.

Interessante è l'implementazione della tecnica di Digital Imaging Correlation (DIC) durante la prova i compressione che evidenzia in mappa di colori le zone di cedimento della schiuma, almeno sul lato visibile, corrispondenti alle zone con porosità di maggiore dimensione.

Nell'attività si è fatto uso del DIC 2D per rilevare la deformazione laterale dei campioni, durante le prove di flessione e di compressione monoassiale.

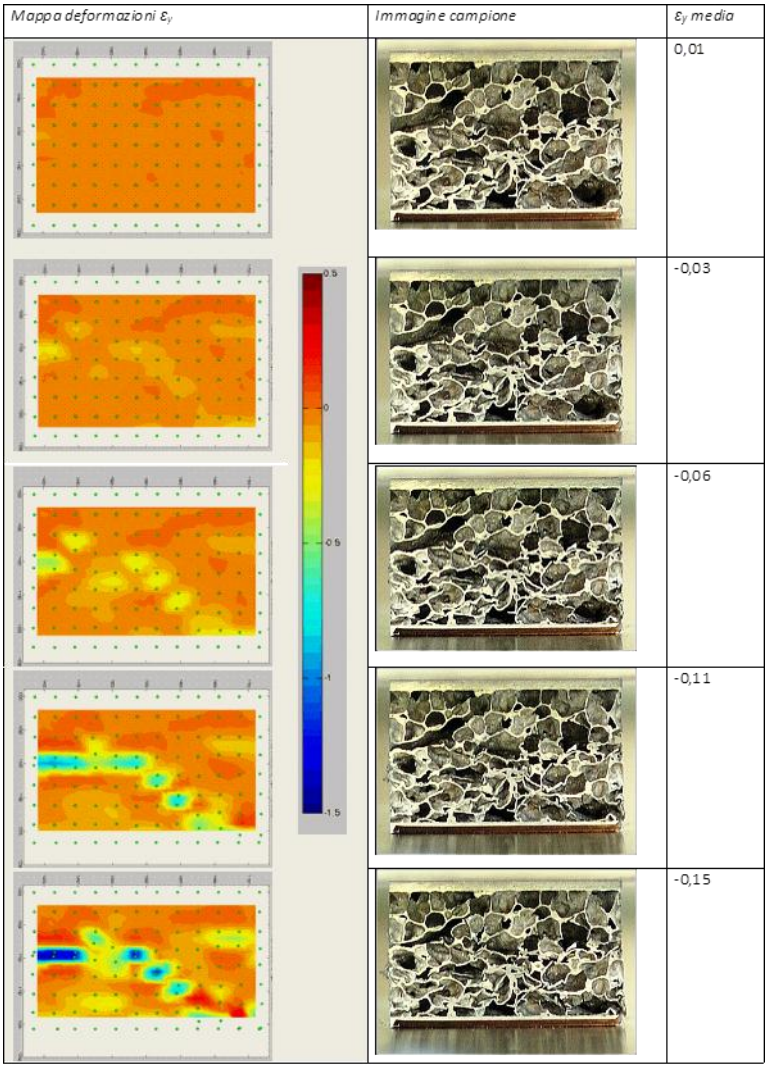


Figura 469. Deformazione del campione durante la compressione mediante analisi DIC

Il sistema di misura è costituito da una fotocamera digitale NIKON, modello D1X (dimensione del sensore 24 x 16 mm) con obiettivo zoom 24 - 120 mm. Durante la prova di flessione l'obiettivo zoom è stato adoperato con 28 mm di focale. La camera è stata montata su idoneo supporto regolando la posizione in modo da far coincidere il centro dell'immagine con quello del provino. Le immagini hanno risoluzione 3008 x 1960 pixel.

La tecnica acquisita grazie al lavoro svolto in collaborazione con l'Università Roma Tre (Report RdS/2012/100) è stata quindi applicata alle prove sia di flessione sia si compressione. L'acquisizione delle immagini ad intervalli di 5 secondi permette di seguire molto chiaramente l'andamento della prova, di ricavare filmati animati in cui è possibile osservare l'esatto istante di frattura.

Oltre che nell'analisi globale del campione la DIC è stata applicata da en epe analizzare zone critiche del campione come ad esempio le zone di scorrimento fra i punzoni.

Presa a riferimento una parte del pannello compresa tra un appoggio e il punzone ad esso vicino, si sono definiti quattro insiemi di 4 marker adiacenti (Figura 470) posti ai vertici di una regione quadrata.

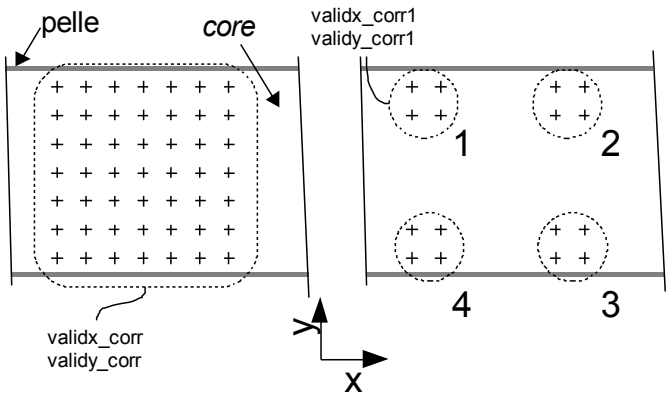


Figura 470. Gruppi di marker per il calcolo dello scorrimento

Le quantità d_{13} e d_{24} sono rispettivamente le distanze tra i "baricentri" dei gruppi 1, 3 e 2, 4. Lo scorrimento è quindi dato dalla differenza delle diagonali divisa per il suo valore iniziale

$$\gamma_{xy} = \frac{d_{13} - d_{13}^0}{d_{13}^0} - \frac{d_{24} - d_{24}^0}{d_{24}^0} = \frac{d_{13} - d_{24}}{d^0}$$

I calcoli sono svolti in pixel, confidando in un uguale rapporto di conversione, nelle due direzioni, tra dimensioni fisiche e dimensioni immagine, cosa che può comunque essere verificata conoscendo le dimensioni del campione e leggendo quelle dell'immagine. Con le posizioni successivamente assunte dai marker considerati si può quindi risalire alla deformazione di scorrimento (γ) nel corso della prova. Nella figura la γ è messa in relazione (valori assoluti) con lo sforzo di taglio, dato da

$$\tau = \frac{P/2}{b\,(c+t)}$$

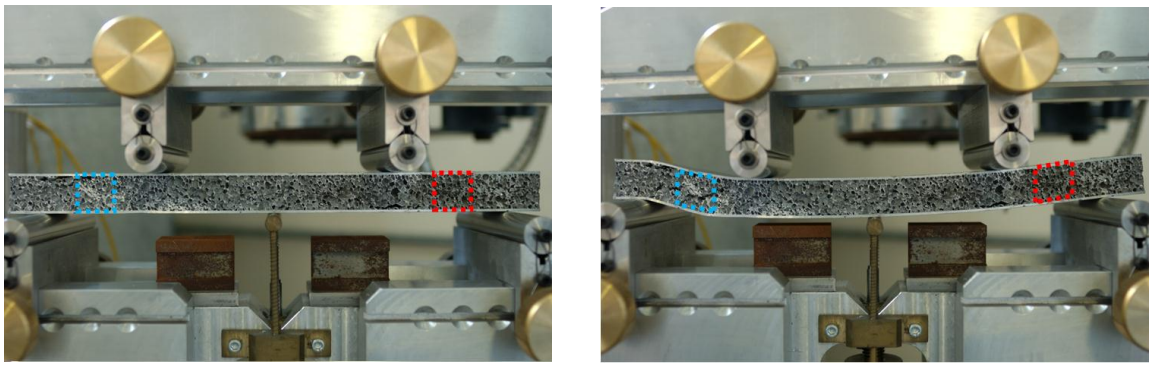


Figura 471. Regioni utilizzate per il rilievo dello scorrimento

Le due curve si riferiscono a parti diverse del provino, a destra e a sinistra della mezzeria (Figura 472) in cui è presente lo stesso taglio ma si hanno deformazioni diverse. La zona a sinistra, che è quella in cui si verifica la frattura, appare più cedevole fin dall'inizio (Figura 472) e presenta una maggiore duttilità. Le curve sono tracciate fino al momento della frattura, dopo di che risulta più difficile sia seguire gli spostamenti (almeno a sinistra) sia valutare le forze in quanto l'attrezzatura di prova ha una sensibile rotazione.

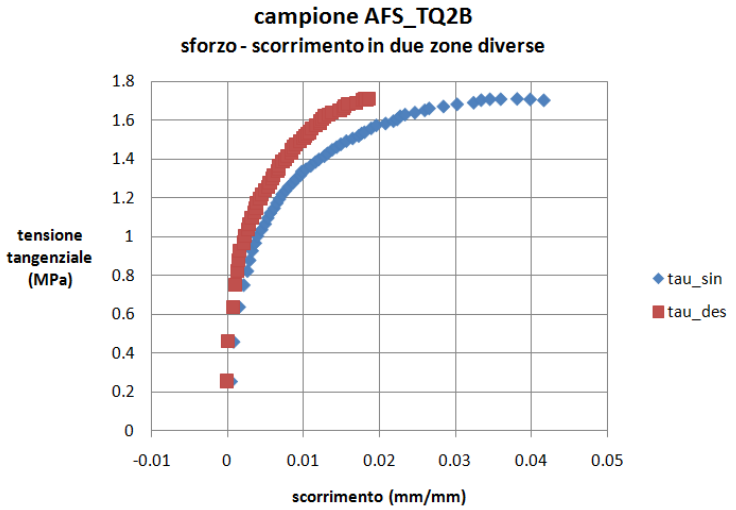


Figura 472. Andamento dello sforzo di taglio durante la prova

Il valore limite del carico (1,7 MPa circa) equivarrebbe una tensione limite a trazione $\sigma = 1{,}5\,\tau$ cioè 2,5 MPa circa. Il valore medio del modulo di elasticità tangenziale, 305 MPa, è compatibile (ipotizzando v=0,3) con un valore del modulo E pari a circa 800 MPa, in linea con quanto rilevato nella prova di compressione.

Ulteriori considerazione ed analisi sono contenute nel rapporto tecnico a cui si rimanda per approfondimenti relativi al comportamento sotto carico dei pannelli AFS.

Conclusioni sulla caratterizzazione meccanica di pannelli AFS

Le analisi fatte sono servite per conoscere più dettagliatamente le caratteristiche fisiche di questi materiali, e le loro potenzialità.

Inoltre, visto che i pannelli AFS vengono utilizzati per applicazioni in cui si richiede essenzialmente una resistenza alla sollecitazione di flessione, possiamo concludere che la prova di flessione a quattro punti, è quella attraverso la quale è possibile ricavare l'indice prestazionale per la qualifica della saldatura dei pannelli AFS.

Facendo la media dei valori delle σ trovate nelle prove fatte (escludendo quella del campione TQ1, il cui lato maggiore è parallelo alla direzione di laminazione), si ottiene: σ = 83.6 MPa, con una deviazione standard di 4 MPa, la resistenza a compressione e di circa 4 MPa. Il modulo di elasticità può essere posto a pari a 800 MPa con il modulo di Poisson = 0,3. Va tenuto in considerazione che la resistenza nella direzione di laminazione è sostanzialmente più elevata. Tuttavia va considerato che il comportamento elastico in prove di flessione è mantenuto mediamente fino a 25 MPa di tensione nelle pelli e 0.5 MPa di taglio nel core.

I risultati relativi alla caratterizzazione a flessione dei giunti saldati, sollecitati nella direzione di massima resistenza hanno mostrato quasi sempre rottura nel core e non nella giunzione se non in un caso limite in cui la rottura nella ZTA è avvenuta al di sopra dei limiti previsti dall'EUROCODICE 9 (> 140 MPa per una lega AA6060 saldata)per la particolare lega trattata.

Scelta e progettazione di un componente modulare per il settore trasporti in AFS

Questa parte del lavoro, svolta avvalendosi di una collaborazione con il consorzio CALEF, ha riguardato una prima fase di analisi dei possibili vettori per l'applicazione di questo specifico materiale. In particolare, ci si è concentrati sui mezzi direttamente collegati alla rete elettrica per cui considerata la notevole evoluzione nel settore ferroviario è stata effettuata una ricerca sulle normative che è necessario applicare ai componenti di questo settore sia per quanto riguarda il calcolo e la progettazione sia per quanto riguarda la successiva ed indispensabile fase di omologazione.

Oltre ai limiti relativi alla resistenza meccanica cono state considerati anche i limiti relativi alla resistenza al fuoco dei materiali strutturali nel settore ferroviario.

Il componente tipo scelto al fine di valutare il risparmio di peso possibile grazie all'impegno di Alluminum Foam Sandwich (AFS) è il pavimento flottante di vagoni passeggeri per treni a medio/lunga percorrenza. La scelta di questo tipo di componente è legata a una serie di considerazioni:

- è un componente facilmente modulabile;
- essendo collegato al telaio della cassa mediante giunti anti-vibranti, non ha una funzione strutturale e quindi la sostituzione di questo componente minimizza i tempi di re-ingegnerizzazione dei carri;
- durante la vita operativa è soggetto prevalentemente a condizioni di carico flessionali – dovute sia alle condizioni di vincolo (appoggi alle estremità) sia di carico (carichi concentrati e distribuiti su una sola delle facce – ovvero quelle ottimali per l'utilizzo di strutture sandwich.

In Figura 473 è riportato un tipico schema di pavimento galleggiante per treni.

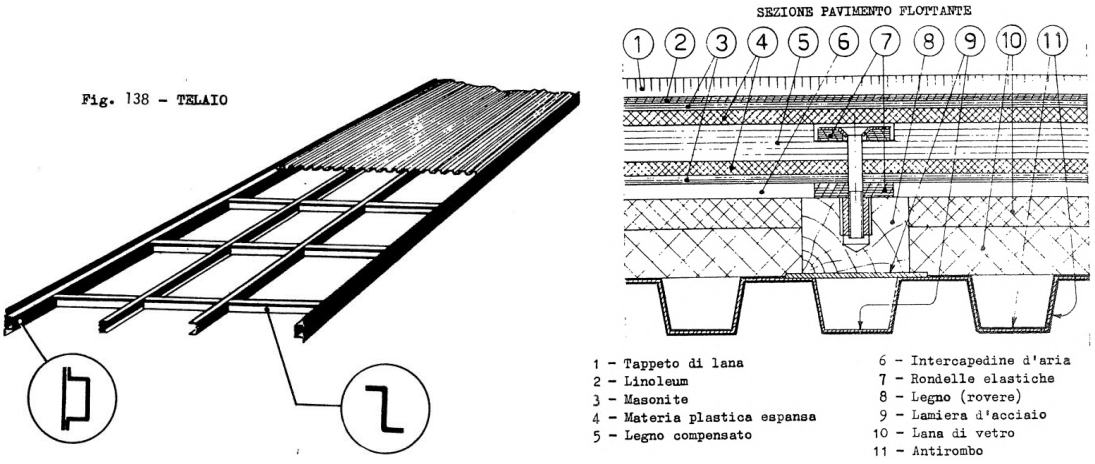


Figura 473. Posa pavimento flottante su telai (a); sezione pavimento flottante (b)

Di seguito si elencano le condizioni di carico a cui devono essere verificati i pavimenti flottanti per veicoli ferroviari classe P-I in base alla normativa vigente.

1) Carico statico verticale nelle condizioni di massimo carico operativo: $1{,}3 \times g \times (m_1 + m_4)$
dove g è l'accelerazione di gravità, m_1 è la massa propria del componete e m_4 è la massa del carico pagante in condizioni eccezionali che per i treni a medio lunga percorrenza vale:
   - 80 kg per passeggero compreso i bagagli seduto con il 100% di posti seduti occupati;
   - sedute ripiegabili non occupate;
   - da 160 a 320 kg/m^2 (da 2 a 4 passeggeri/ m^2) nelle zone di sosta in piedi;
   - 300 kg/m^2 nei compartimenti bagagli.
2) Verifica dei collegamenti tra gli equipaggiamenti e il pavimento considerando la massa degli equipaggiamenti stessi m_2 e l'eventuale carico pagante in condizioni normali m_3:
   - accelerazione in direzione x ±5 g
   - accelerazione in direzione y ±1 g
   - accelerazione in direzione z $(1 \pm c) \times g$ dove c varia linearmente tra 2 alle estremità del veicolo a 0,5 al centro.
3) Verifica dei carichi di fatica generali:
   - accelerazione in direzione y ±0,15 g
   - accelerazione in direzione z $(1 \pm 0{,}15) \times g$
4) Eventuale verifica a fatica dei collegamenti tra gli equipaggiamenti e il pavimento.

E' stato quindi riprogettato un pavimento fondamentalmente considerando la verifica sull'assieme lamiera grecata ed il compensato. Al fine di verificare il comportamento ai carichi statici della lamiera, così come previsto dalla norma EN 12663-1: 2010, si è realizzato un modello numerico agli elementi finiti mediante il software commerciale Abaqus/CAE 6.9.

In estrema sintesi la figura seguente mostra il risultato relativo ad una lamiera grecata con altezza di 26 mm, un passo di 74 mm e uno spessore di 1 mm. La lamiera è realizzata in acciaio inossidabile X10CrNi1809 a cui viene sovrapposto un compensato di faggio da 15 mm di spessore.

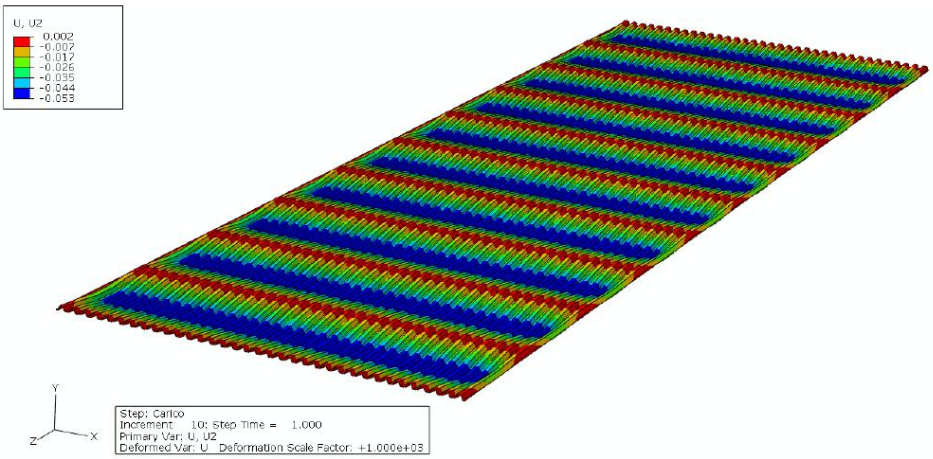


Figura 474. Mappa degli spostamenti della lamiera grecata in direzione Y. (Rapporto di magnificazione delle deformazioni 1:1000)

Il rapporto tra la freccia massima δ_{max} e luce tra i longheroni L = 2590 mm vale:

$$\delta_{max} = 0{,}053 \text{ mm} = L/48868 << L/400$$

che quindi è ampiamente verificata. Il peso specifico del pavimento così realizzato è di 22,86 kg/m^2.

Lo stesso componente è stato riprogettato prendendo come materiale di riferimento l'ottimizzazione di un pannello AFS. L'ottimizzazione strutturale del pavimento con l'obiettivo della riduzione del peso è stata eseguita con un modello agli elementi finiti utilizzando il software commerciale ANSYS® 10.0. Il modello utilizzato per l'ottimizzazione (Figura 475) è rappresentativo di un pannello in schiuma di alluminio di dimensioni pari a 2590 mm x 1500 mm, ipotizzando che i pannelli vengano forniti in tali dimensioni.

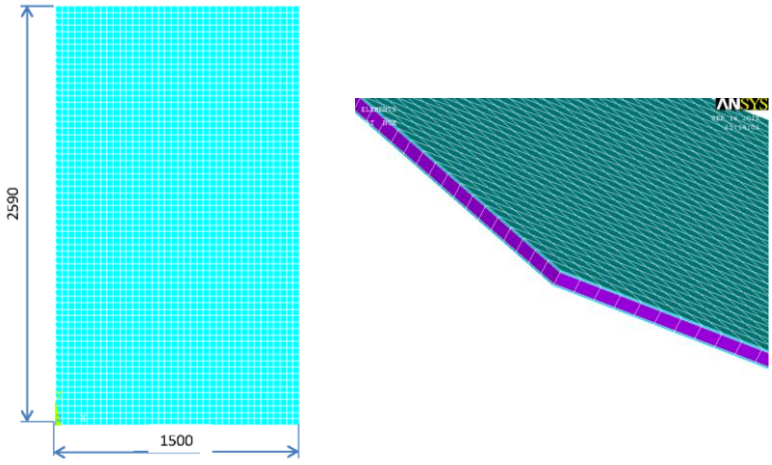


Figura 475. - Modello CAD del pannello in schiuma di alluminio (misure in mm)

Il modello è stato discretizzato utilizzando elementi solid a 8 nodi.

Si ipotizza che il pannello venga semplicemente appoggiato sulle estremità. Il calcolo di ottimizzazione è stato eseguito con queste condizioni di vincolo.

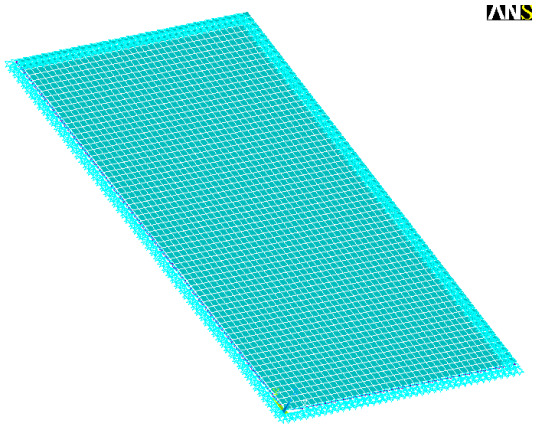


Figura 476. Condizioni di vincolo sul pannello in schiuma di alluminio per il processo di ottimizzazione

Il carico applicato è identico a quello calcolato nella fase I, nella progettazione del pavimento con la soluzione che adotta la lamiera grecata. Il processo di ottimizzazione viene semplificato non tenendo conto della variazione del peso del pannello durante le successive iterazioni. Si considera, dunque, il peso massimo del pavimento ottenuto nella fase I, considerando quindi una situazione più gravosa e quindi ponendoci in condizioni di sicurezza.

Il carico è applicato come una pressione uniforme sull'intera superficie superiore del pannello.

Nel processo di ottimizzazione sono stati definiti diversi parametri. I parametri di design, sono le caratteristiche del pannello in schiuma di alluminio che l'algoritmo di ottimizzazione perturberà per raggiungere la minimazzazione della funzione obiettivo. I parametri di design possono variare tra un minimo ed un massimo fissati nell'algoritmo, e sono:

- spessore delle pelli: 1 mm < t_{skin} < 5 mm
- spessore del core: 10 mm < t_{core} < 30 mm
- peso specifico della schiuma di alluminio: 3%(ρ_{Al}) < ρ_{foam} < 20%(ρ_{Al}).

I parametri di vincolo sono quelle caratteristiche della risposta meccanica del materiale che devono essere rispettate in virtù della resistenza del componente. Sono stati stabiliti i seguenti parametri di vincolo:

- coefficiente di sicurezza per la tensione massima nelle pelli: CSskin ≥ 1,5
- coefficiente di sicurezza per la tensione massima nel core: CScore ≥ 2
- spostamento massimo del pannello: Umax ≤ width/300

dove *width* è la larghezza del pannello, ovvero 1500 mm.

Infine è stata definita la funzione obiettivo del processo di ottimizzazione, ovvero la minimizzazione del peso.

Dall'analisi di ottimizzazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

- peso totale del pannello: 32,196 kg; 8,287 kg/m^2
- spessore delle pelli: tskin = 1,009 mm
- spessore del core: tfoam = 28,969 mm
- peso specifico della schiuma di alluminio: ρ_{foam} = 98,033 kg/m^3; 3.63% di ρ_{Al}
- spostamento massimo: Umax = 5,010 mm (width/300 = 5 mm)
- coefficiente di sicurezza per la tensione massima nelle pelli: CS_{skin} = 6,5
- soefficiente di sicurezza per la tensione massima nel core: CS_{core} = 2,0

Con questa configurazione si ottiene una tensione massima nelle pelli di 30,6 MPa e nel core di 0,18 MPa. La Figura 477 mostra la mappa delle tensioni di Von Mises, sulle superfici superiori ed inferiori delle pelli e del core.

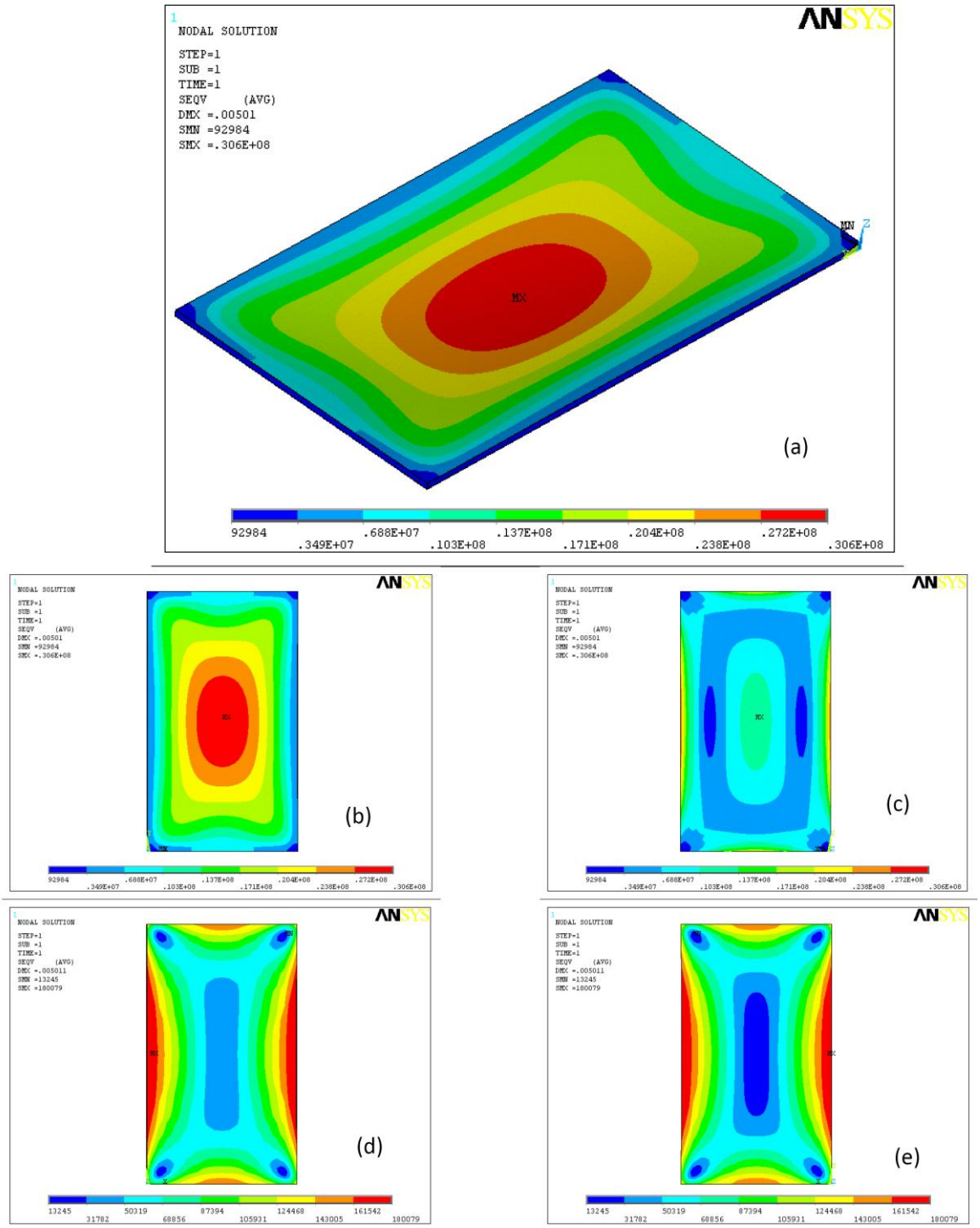


Figura 477. Mappa delle tensioni di Von Mises: (a) mappa generale; (b) tensioni sulla superficie superiore delle pelli; (c) tensioni sulla superficie inferiore delle pelli; (d) tensioni sulla superficie superiore del core; (e) tensioni sulla superficie inferiore del core. (misure in MPa)

Infine il pannello in schiuma di alluminio con le caratteristiche geometriche ottenute dall'analisi di ottimizzazione è stato verificato con le stesse configurazioni di vincolo descritte nella fase I. Le caratteristiche geometriche scelte sono:

- spessore delle pelli: tskin = 1,0 mm;
- spessore del core: tfoam = 29,0 mm;
- peso specifico della schiuma di alluminio: ρ_{foam} = 108,0 kg/m^3; 4% di ρ_{Al};
- peso totale del pannello: 170.97 kg;
- peso specifico pannello: 8,46 kg/m^2.

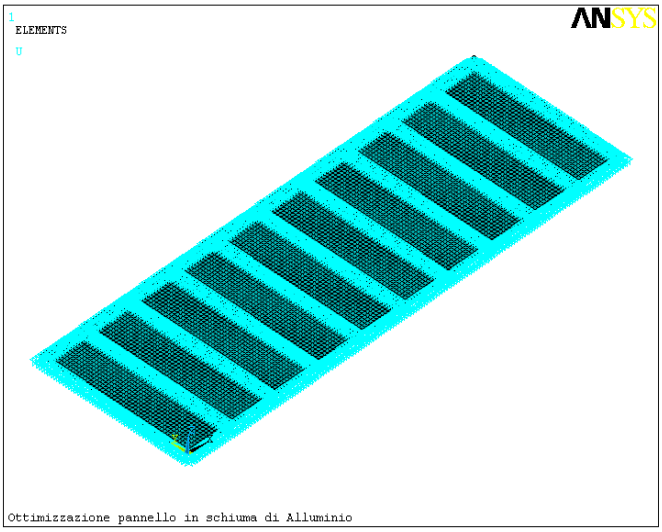


Figura 478. Condizioni di vincolo sul pannello in schiuma di alluminio per l'analisi di verifica

Con tale configurazione si ottengono i seguenti risultati:

- spostamento massimo: Umax = 0,514 mm = width/1517
- coefficiente di sicurezza per la tensione massima nelle pelli: CS_{skin} = 24
- coefficiente di sicurezza per la tensione massima nel core: CS_{core} = 4,2
- tensione massima nelle pelli: $S_{maxskin}$ = 8,0 MPa
- tensione massima nel core: $S_{maxfoam}$= 0,11 MPa

Conclusioni

L'utilizzo di un pannello sandwich in schiuma di alluminio ottimizzato ha permesso un risparmio di peso pari a circa il -63% rispetto alla soluzione tradizionale costituita da una lamiera grecata e un pannello di compensato (sandwich alluminio: 8,46 kg/m^2; soluzione classica: 22,86 kg/m^2). Questo dimostra il grande vantaggio ottenibile dall'utilizzo di questo tipo di soluzione nei mezzi di trasporto collettivi e in particolar modo in quelli ferro-tramviari. Inoltre il sandwich ottimizzato ha uno spessore complessivo di 30 mm mentre lo spessore della lamiera grecata più il compensato è di 41 mm complessivi. L'uso delle schiume in alluminio permette pertanto un ulteriore e non secondario vantaggio di ridurre lo spessore del pavimento di circa il -27% con conseguenti vantaggi da un punto di vista logistico e ingegneristico.

E' tuttavia necessario considerare che, per quanto auspicabile, va verificata la reale fattibilità industriale di un pannello con una densità del core di solo il 4% della densità dell'alluminio in quanto i valori della densità relativa della schiuma, industrialmente noti per AFS con legame metallurgico, difficilmente sono inferiori a 10 %. Tuttavia, considerando la densità di core di 0,34 g/cc (pannello qualificato), dove gli sforsi di taglio in campo elastico sono di circa 0,5 MPa, avremmo un pannello con pelli da 1 mm che avrebbe un peso superficiale di 14,92 kg/mq con una riduzione di peso del 35% molto probabilmente ulteriormente incrementabile in quanto una densità maggiore del core e quindi una maggiore resistenza a scorrimento permetterebbe di ridurre lo spessore del core.

F. Sviluppo di processi di ibridizzazione di microsfere metalliche con polimeri termoplastici e di processi per l'impiego di fibre naturali in compositi termoplastici

F.1 Tecnologie innovative per la realizzazione di compositi a matrice polimerica con rinforzo in fibre naturali

Il lavoro svolto dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica e della Produzione (DIMP) dell'Università Napoli Federico II ha come obiettivo di ricerca lo studio e lo sviluppo di tecnologie per la formatura di elementi in composito con matrice termoplastica e rinforzo in fibre naturali. In particolare come rinforzo sono state adottate polpa di legno e fibre lunghe di canapa, mentre per la matrice si è scelto il polietilene ad alta densità [Report RdS/2012/103].

La scelta della tecnologia si è basata sul criterio del risparmio energetico considerando la produttività (in particolare il tempo di permanenza in forno) ed i costi di attrezzaggio. Proprio per la riduzione dei costi di attrezzaggio si è mirato a processi in cui non vi fosse la necessità di controstampo in metallo (rigido).

Dall'analisi bibliografica si evince che il rubber forming, che prevede lo stampaggio con controstampo in gomma, consente la formatura di lamiere metalliche, per la realizzazione di elementi per mezzi di trasporto. Mentre una tecnologia molto impiegata negli ultimi anni nel campo dei compositi è l'infusione sottovuoto.

La fase sperimentale è cominciata con l'acquisizione di una pressa idraulica per realizzare il processo di rubber forming per laminati in composito.

Nel processo di formatura (Figura 479) lo stampo superiore realizzato in gomma è collegato ad una pressa idraulica mentre quello di acciaio, modellato secondo la forma finale del prodotto da ottenere, è posto inferiormente. La pressa idraulica consente la regolazione ed il controllo della pressione e della velocità di funzionamento.

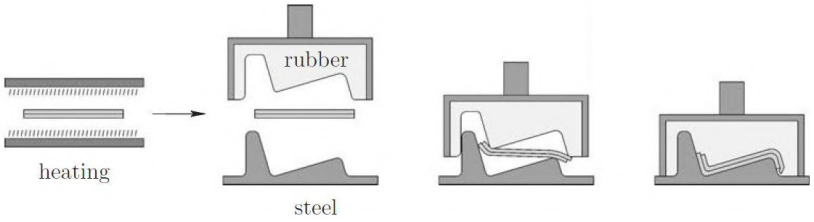


Figura 479. Processo di rubber forming

Per la realizzazione dei laminati piani di partenza sono stati impiegati pellets di WPC (wood pulp composite), PE e fibre di canapa, i laminati sono stati ottenuti con una pressa a piani caldi a temperatura di 200 °C con permanenza in pressa per un tempo di circa 60 secondi.
Sono state realizzate le seguenti tipologie di laminati :

I. laminati costituiti da solo polietilene;
II. laminati con polietilene e fibra di canapa posta in modo unidirezionale;
III. laminati costituiti da solo WPC;
IV. laminati in WPC e fibra di canapa unidirezionale;

Per le operazioni di formatura è stata impiegata un'attrezzatura dotata di un carrello di carico/scarico sul quale si dispongono i laminati, di un forno nel quale i laminati vengono riscaldati e di una pressa sotto la quale i laminati vengono formati secondo la geometria dello stampo. La fase di carico prevede il posizionamento del laminato da formare sul carrello. Dopo la fase di carico, vi è la fase di riscaldamento del laminato in forno per circa 10 secondi. In seguito, il carrello porta il laminato, riscaldato, nella zona della pressa dove avverrà la fase di formatura.

Mediante l'apposito pannello di controllo, oltre ai comandi per azionare l'abbassamento e la risalita del pistone idraulico della pressa, è possibile controllare temperatura del forno e dello stampo metallico e forza di chiusura della pressa. E' stato utilizzato un valore di forza di chiusura per la pressa molto basso pari a 180 N.

Una volta terminata la fase di formatura, utilizzando il carrello di carico/scarico è possibile estrarre dalla macchina il laminato.

In Tabella 94 si riportano le tipologie di pezzi realizzati ed in Figura 480 una fotografia di un pezzo in WPC a forma di L.

Tabella 94. Tipologie di materiali realizzati

Laminato	Materiali	Spessore (mm)
A	PE	0,5-1-1,5-2
B	PE+20%canapa	1-1,5-2
C	WPC20%	0,8-1-1,5-2
D	WPC40%	0,8-1-1,5-2
E	WPC20%+15% canapa	1,5-2
F	WPC40%+10%canapa	1,5-2

Figura 480. Mensola di tipo F

Tutti pezzi realizzati sono stati oggetto di accurate osservazioni visive e misure per la valutazione della geometria; in particolare per la valutazione della qualità del prodotto sono stati esaminati i valori dell'angolo di piegatura e la variazione di spessore per il singolo pezzo. In base al valore dell'angolo di piegatura sono stati ottimizzati i tempi e le temperature del processo. Nei pezzi realizzati in composito è stato possibile osservare la disposizione lineare ed unidirezionale delle fibre di rinforzo in canapa presenti al loro interno dopo la formatura.

Dall'analisi dei dati si è potuto osservare che:

- una diminuzione di spessore più accentuata, si è avuta in corrispondenza della piegatura delle mensole;
- all'aumentare degli spessori dei laminati aumenta anche la variazione percentuale degli spessori;
- la presenza di fibre lunghe di rinforzo nei laminati genera maggiore variazione percentuale degli spessori.

Inoltre, sempre l'osservazione visiva ha evidenziato:

- una buona finitura superficiale con assenza di difetti ed inclusioni gassose;
- nella sezione della lamina assenza di porosità all'interno dei compositi plastici.

In Figura 481 vi è l'andamento della variazione di spessori per i pezzi realizzati in solo WPC al 40.

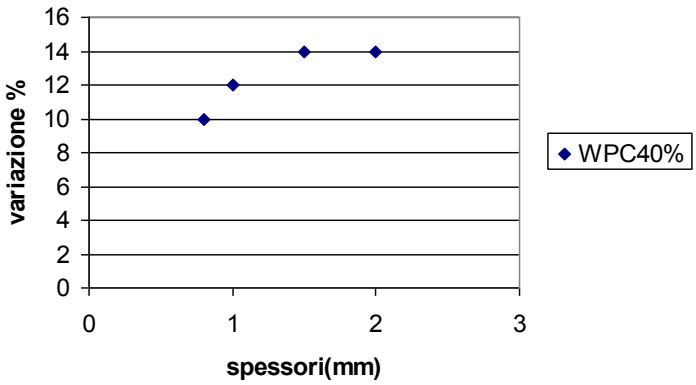


Figura 481. Variazione percentuale degli spessori in funzione dello spessore

Difficoltà notevoli si sono registrate per le tecniche di infusione. In particolare non è stato possibile aspirare tra sacco e stampo il polietilene a temperature inferiori ai 220 °C (temperatura al di sopra della quale si ha degradazione delle fibre).

Per tale motivo si è deciso di adottare una variante disponendo pellets di PE con fibre lunghe tra sacco e stampo riscaldato a 180 °C, successivamente è stato realizzato il vuoto per compattare i granuli. Il risultato della prova non è stato però soddisfacente in quanto si è generato un film compatto solo a contatto con lo stampo, mentre il materiale a contatto con il sacco non è stato formato. Un tentativo successivo è stato realizzato impiegando non più granuli ma film di PE e fibre lunghe. In questo caso è stato possibile realizzare il composito, ma con spessore inferiore ad 1 mm.

Si può quindi concludere che tra le diverse tecnologie il rubber forming garantisce una migliore qualità del prodotto.

Nell'ultima fase si è proceduto alla caratterizzazione meccanica degli elementi prodotti per verificare la variazione di proprietà in seguito al processo di formatura: La caratterizzazione è stata condotta su provini tagliati dagli elementi formati. Per ogni tipologia di prova sono stati testati 5 provini. I risultati delle prove in termini di massima resistenza e di rigidità sono stati confrontati con i valori ricavati da prove condotte sul materiale prima della formatura e da tale confronto non si sono verificate differenze.

E' stata poi condotta una caratterizzazione degli elementi realizzati con uno schema particolare di prova per valutare il cedimento delle mensole realizzate.

Dai risultati di queste prove si è potuto rilevare una maggiore rigidità, a parità di spessore, delle mensole realizzate in materiale composito rinforzato con fibre di canapa.

Infine sono state condotte prove per valutare la riciclabilità dei prodotti. Per quest'ultima tipologia di prova sono stati utilizzati i pannelli in WPC al 40%. Dopo aver formato la prima mensola, questa è stata tagliata in pezzi di area di circa 4 cm^2, che sono stati successivamente pressati nella pressa a piani caldi per realizzare i laminati piani da formare con il processo di rubber formig. Si è ripetuto per tre volte il procedimento e successivamente da provini ricavati dall'ultima mensola sono stati realizzati i test meccanici di trazione. Dall'analisi visiva è però risultato un notevole cambio di colore del materiale che si presentava molto imbrunito in seguito alla permanenza in forno. Dai risultati delle prove non si è notato una variazione delle proprietà meccaniche.

In conclusione si può dedurre che le operazioni di formatura e quelle di riciclaggio non comportano un decadimento delle proprietà meccaniche del materiale. Per maggiori chiarimenti si rimanda al rapporto tecnico RdS/2012/103.

F.2 Nuovi materiali biocompositi ottenuti mediante l'utilizzo di tessuti commingled a base PLA/fibre di lino e di canapa

Sono stati selezionati tessuti di tipo "commingled" a base di PLA/Fibre di lino e PP/ fibre di lino. Dopo una ricerca di mercato, sono stati acquistati i tessuti "commingled", Biotex, della Composites Evolution costituiti di fibra di lino al 40% e fibre di PLA e PP al 60%.

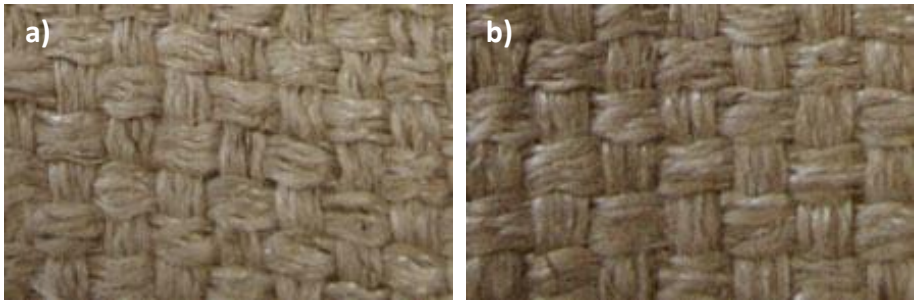


Figura 482. Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530 gsm (a); Biotex 40% Flax/PP 4x4 Hopsack 550 gsm (b)

Sono stati condotti studi preliminari sui parametri di processo di stampaggio per la realizzazione di laminati termoplastici. A tale scopo è stata utilizzata una pressa a piatti piani, per la laminazione dei tessuti Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530gsm.

Lo studio del processo di stampaggio per la realizzazione dei compositi termoplastici fin qui svolto, si è effettuato utilizzando una pressa a piatti piani CAMPANA.

Per l'ottenimento di pannelli del materiale composito dai tessuti Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530 gsm si sono utilizzati 4 strati di tessuto sovrapposti pressati secondo i seguenti parametri di processo (altri parametri di processo per lo studio dello sviluppo del processo di stampaggio del suddetto composito sono in fase di sperimentazione) :

Per ogni set di parametri di processo sperimentati sono stati ottenuti dei laminati di tessuto stampato dai quali sono poi stati ritagliati i campioni secondo la geometria indicata nella norma tecnica di prova ASTM D 693M per le prove a trazione.

Figura 483. Esempi di mattonelle di tessuto stampato in diverse condizioni di processo e di provini di trazione da essi ricavati

Le prove di trazione, secondo la norma tecnica ASTM D638M, sono state eseguite con una macchina per prove statiche, Tabletop MTS Alliance 50 kN equipaggiata con:

- cella di carico MTS con fondo scala da 2 kN (accuratezza del trasduttore di carico 0,04%; accuratezza globale di misura del carico +/- 0,5% del valore letto);
- estensometro a contatto MTS (campo di lavoro +/- 4 mm);
- afferraggio dei campioni mediante morsetti MTS a cuneo autostringenti.

In Figura 484 sono riportate alcune foto dei campioni del composito ottenuto per stampaggio dopo rottura al test di trazione.

Figura 484. Aspetto dei provini dopo rottura

Le prove hanno mostrato un basso valore del modulo (MPa) così come del Peak Stress (MPa) che indicano una scarsa adesione tra la fibra e la matrice costituitasi durante il processo di stampaggio, evidenziata anche da preliminari osservazioni SEM sulla sezione del laminato A.

Di seguito si riportano i risultati delle prove effettuate sul campione identificato come FLAXPLAT180P50t20s4 (A).

Tabella 95. Risultati prove

Specimen	Thickness mm	Width mm	Peak Load N	Peak Stress MPa	Modulus MPa	Strain_max mm/mm
1	1,707	5,660	207,159	21,4	4174,856	0,087
2	1,746	5,610	261,275	26,7	3375,664	0,064
3	1,786	5,590	224,209	22,5	3615,943	0,077
4	1,769	5,690	189,352	18,8	3345,756	0,073
5	1,806	5,660	192,427	18,8	3617,244	0,051
6	1,815	5,660	273,105	26,6	3460,417	0,059
MeaMedia	1,772	5,645	224,588	22,5	3598,313	0,069
Std, Dev,	0,040	0,037	35,439	3,5	305,105	0,013

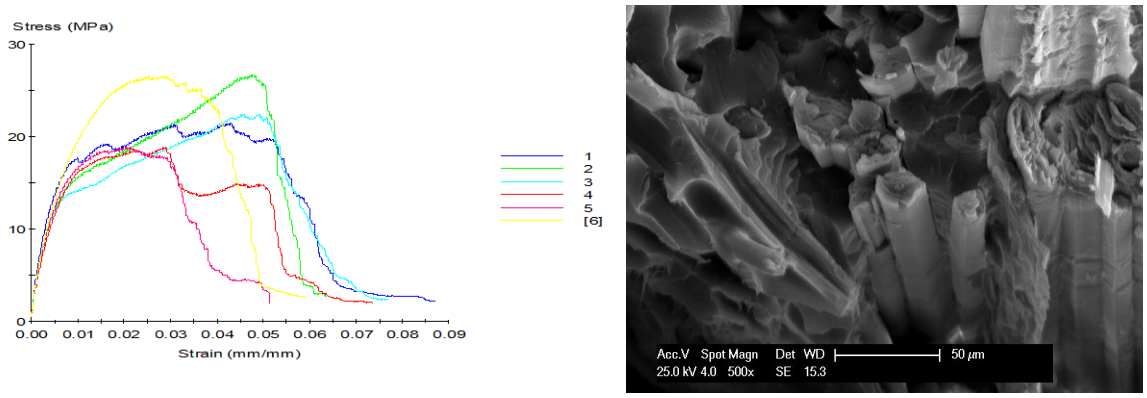


Figura 485. Grafico tensione deformazione ed immagine SEM relativi ai provini del campione A

I risultati delle caratterizzazioni meccaniche e delle osservazioni SEM sui laminati prodotti, suggeriscono quindi una scarsa adesione tra la fibra e la matrice. Pertanto i parametri di processo necessitano di ulteriori studi, per l'ottimizzazione del laminato ottenuto.

Al fine di ottimizzare il processo di laminazione si sono quindi investigati ulteriori parametri di processo, sperimentando soprattutto temperature e pressioni di processo inferiori.

In questo caso si sono misurati valori del modulo elastico e valori del Peak Stress più alti sia rispetto a quelli del PLA tal quale di riferimento, sia rispetto al primo lotto di campioni analizzati.

Sono qui di seguito riportati i valori ottenuti dalle prove di trazione di uno dei laminati compositi ottenuti per stampaggio secondo i nuovi parametri di processo impostati.

Figura 486. Risultati prove di trazione su campione FLAXPLAT180P50t10s4_0 (D)

Specimen #	Larghezza mm	Spessore mm	Carico massimo N	Stress (max) MPa	Modulo elastico MPa	Chord Modulus Strain 1 - 2 MPa
D1_0 (1)	5,7200	1,6840	635,11	65,9	7932,4	6993,6
D2_0 (2)	5,7990	1,6340	714,96	75,5	9266,9	7833,8
D3_0 (3)	5,7800	1,6700	660,38	68,4	10776,8	8766,9
MeaMedia	5,7663	1,6627	670,15	69,9	9325,3	7864,8
Std. Dev.	0,0412	0,0258	40,81	4,9	1423,1	887,1

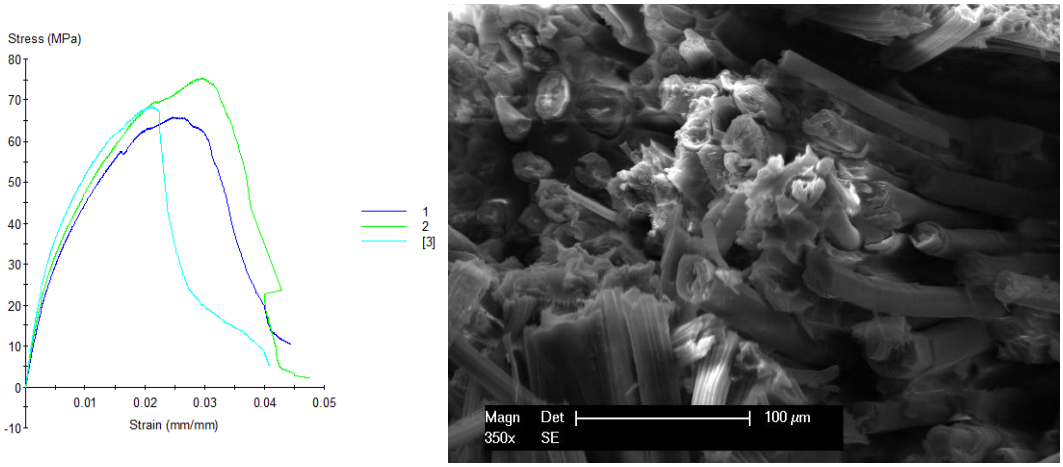


Figura 487. Grafico tensione-deformazione ed immagine SEM relativi ai provini del campione D

Per maggiori informazioni di rimanda al Report RdS/2012/104.

F.3 Tecnologie di scale-up del processo di produzione di materiali ibridi metallo polimero basati su sfere/grani cavi

Le attività di sperimentazione finalizzate allo scale-up ed ottimizzazione del processo di produzione di granuli di alluminio porosi si sono svolte avvalendosi del contratto di ricerca con il consorzio Procomp [Report RdS/2012/105].

Relativamente alla Fase 1 avente per oggetto l'aumento delle porosità nei granuli, si è proceduto con la produzione di lotti di granuli con un maggiore quantitativo di resina termoindurente (resina epossidica, microgranuli di policarbonato). La produzione dei granuli prevede un primo step di miscelazione della polvere di alluminio con la resina termoindurente. Questa fase si svolge utilizzando lo stesso impianto che viene utilizzato per la successiva granulazione. Quest'ultima si ottiene aggiungendo una soluzione con rapporto in peso 1:1 di acqua ed apposita resina (Resicer) che funge da legante. La granulazione si completa in pochi minuti con l'ottenimento di granuli con dimensione dispersa. Si procede quindi con la suddivisione delle varie frazioni granulometriche con appositi setacci. La parte più fine si può poi sottoporre ad ulteriore granulazione in modo da ridurre al minimo lo scarto. Un esempio di granuli è riportato in Figura 488.

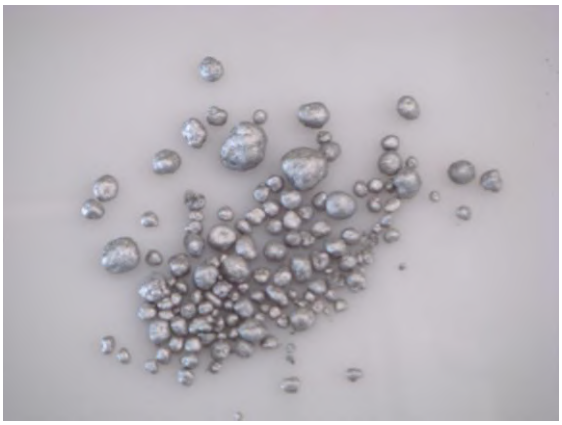


Figura 488. Granuli porosi di alluminio prodotti con porosità incrementata

Per quanto riguarda invece la Fase 2, è stato allestito un forno ad atmosfera controllata per il trattamento termico di pirolisi dei precursori delle porosità (resina termoindurente): il forno può lavorare in atmosfera controllata (flusso di argon) fino a 500°C ed è dotato di programmatore per l'effettuazione di cicli termici riproducibili (Figura 489). Il forno attuale ha una camera di diametro 80 mm e lunghezza 300 mm superiore a quello precedentemente usato (diametro 45 mm, lunghezza 200 mm). Per l'aumento della produzione giornaliera è stato aumentato il volume utile del contenitore di granulazione da 0,5 litri del precedente granulatore ai 2 litri di quello attuale (Figura 490). Con questo nuovo sistema di granulazione è stato possibile arrivare ad una produttività oraria 2-2.5 kg/h. In questa fase sono stati condotti anche svariati test per la definizione della temperatura ottimale di pirolisi. In particolare sono state effettuate delle prove fino a 500°C e verificate le perdite di peso in funzione della temperatura. Con l'ausilio di prove termogravimetriche supportate da misure di densità tramite picnometro ad elio è stato definito il ciclo ottimale di eliminazione dei leganti al fine di ottenere granuli con buona resistenza meccanica utilizzabili per la fabbricazione dei provini per le successive prove meccaniche.

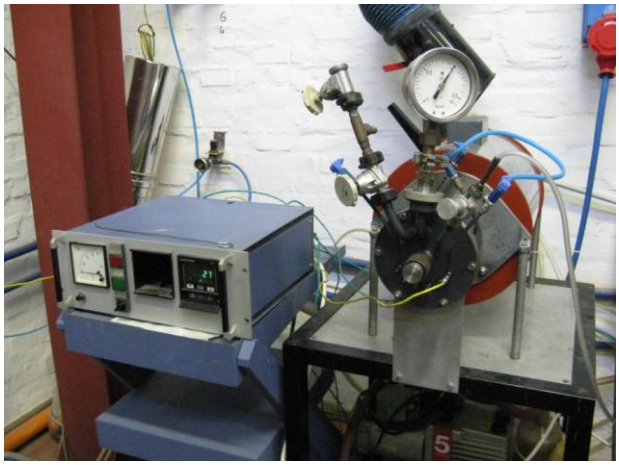


Figura 489. Forno di pirolisi con relativo sistema di programmazione/regolazione

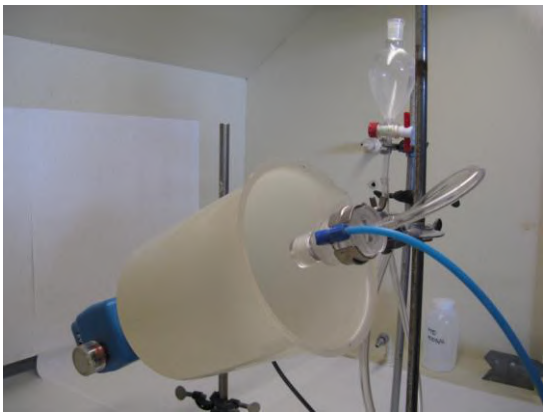


Figura 490. Immagine del sistema di granulazione in scala laboratorio

La caratterizzazione meccanica di provini piani ottenuti con i granuli, è in fase di completamento. I granuli vengono posti tra due campioni di lamiera ed incollati ad esse tramite l'utilizzo di colla epossidica bicompomente polimerizzabile a freddo. Sono state effettuate le prove meccaniche finalizzate alla caratterizzazione in compressione ed in flessione dei provini. Il set up ed i risultati sono illustrati in Figura 491 nelle Tabelle 96 e 97.

I valori di resistenza sia a flessione sia a compressione sono significativamente superiori rispetto a quanto ottenuto nelle prove analoghe dei componenti.

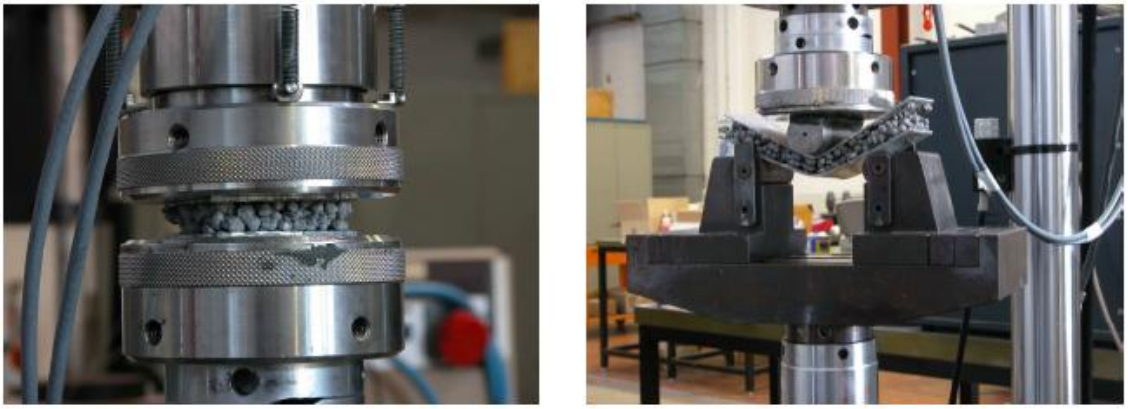


Figura 491. Configurazione del sistema di prova rispettivamente per compressione (sin.) e flessione a tre punti (destra)

La Figura 491 mostra il sistema per la caratterizzazione meccanica di provini piani ottenuti con i granuli. I granuli vengono posti tra due campioni di lamiera ed incollati ad esse tramite l'utilizzo di colla epossidica bicompomente polimerizzabile a freddo. Sono state effettuate le prove meccaniche finalizzate alla caratterizzazione in compressione ed in flessione dei provinil risultati sono illustrati nellein tabella 96 e97.

I valori di resistenza sia a flessione sia a compressione sono significativamente superiori rispetto a quanto ottenuto nelle prove analoghe dei componenti.

Tabella 96. Risultati delle prove di compressione

Campione	Ultimate strength [MPa]	2% deflection stress [MPa]	Compressive modulus [MPa]
campione 1	26	0,15	16
campione 2	25	0,33	9

Tabella 97. Risultati prove di flessione

Campione	P max [N]	Core shear ultimate stress [MPa]	Facing stress [MPa]
campione 1	592	0.419	13.3
campione 2	518	0.366	11.6

PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI

Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione: Elettronica, Informatica, Telecomunicazioni

All'Università di Pisa, nel quadro dell'obiettivo A, sono state affidate le seguenti attività:

- sviluppo e fornitura di un sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System) prototipale completo, partizionato in due sezioni distinte e intercomunicanti, una a livello di modulo 12V (quattro batterie al Li-$FePO_4$ da 100Ah in serie) ed una a livello di sistema 48V (quattro moduli in serie), con bilanciamento di tipo attivo;
- progettazione finale del sistema elettronico di controllo BMS (Battery Management System), in termini di traduzione delle richieste elaborate da ENEA in specifiche progettuali esecutive per il Fornitore del BMS.

L'Università di Pisa ha inizialmente fornito un BMS prototipale [Report RdS/2012/088], che è stato sottoposto da ENEA a prove di confronto con BMS commerciali di altra tipologia (passiva, semiattiva) rappresentativi dello stato dell'arte di tale tipologia di dispositivo. Sulla base dei risultati di detto confronto, ENEA ha effettuato la scelta per il BMS definitivo, confermando la soluzione proposta dall'Università di Pisa, ed ha elaborato una serie di richieste di perfezionamento, sulla base delle quali l'Università di Pisa ha emesso le specifiche esecutive (schemi elettrici e lista parti) per la costruzione della scheda elettronica BMS [Report RdS/2012/089]. Le schede elettroniche alloggiate all'interno dei moduli dimostratori sono state successivamente approvvigionate da una Ditta terzista, specializzata nella costruzione di schede elettroniche, che le ha realizzate sulla base della specifica prodotta dall'Università di Pisa.

Università di Padova, Laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica

L'attività svolta dal Laboratorio di Sistemi Elettrici per l'Automazione e la Veicolistica dell'Università di Padova nell'ambito dell'Obiettivo B, ha riguardato uno studio su tutte le tipologie di caricabatterie "a bordo veicolo", e la riconfigurazione del convertitore di trazione del Ducato, della potenza di 40-50 kW, per ottenerne un caricabatteria bidirezionale. Lo studio ha preso in esame i caricabatteria stand-alone, sia unidirezionali (nelle due categorie "ad alta frequenza" e PFC, che bidirezionali, sia monofase che trifase, per passare poi alla esposizione dei caricabatteria integrali, dal più semplice (caricabatteria integrali unidirezionali) al più completo (caricabatteria integrali, bidirezionali e trifase) [Report RdS/2012/090].

Università dell'Aquila, Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione

il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione dell'Università dell'Aquila, nel quadro dell'obiettivo B, ha effettuato il dimensionamento di un prototipo di convertitore DC/DC controllato in tensione e/o in corrente a seconda del tipo di batteria e del suo stato di carica, della stessa potenza del "caricabatteria a bordo veicolo" da 40-50 kW progettato dall'Università di Padova, allo scopo di effettuare un bench-mark delle due [Report RdS/2012/091].

Università di Palermo, Dipartimento dell'Energia

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento dell'Energia dell'Università di Palermo sono relativi al Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche (Obiettivo C). Le attività svolte [Report RdS/2012/093] nello specifico hanno riguardato:

- la comparazione delle prestazioni energetico- ambientali della batteria Li-ione in studio con quelle di altre batterie;
- l'analisi di sensibilità dei risultati della LCA;
- la definizione di criteri di eco-design da applicare nella progettazione e realizzazione delle batterie Li-Ione.

Università Roma Tor Vergata, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Le attività di ricerca condotte dall'Università di Roma Tor Vergata [Report RdS/2012/097], afferenti all'Obiettivo D, hanno riguardato:

- simulazioni mediante reti neurali delle caratteristiche strutturali di schiume di alluminio;
- misure di spettroscopia meccanica (fattore di damping e modulo elastico dinamico) ;
- studio del bonding metallurgico tra schiume di alluminio e pelli di altri metalli (rame e acciaio) oppure di alluminio.

Università Roma TRE Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Industriale

Le attività di ricerca svolte nell'ambito dell'obiettivo E [Report RdS/2012/100] hanno riguardato:

- sviluppo di metodologie innovative ad alta risoluzione per la misura locale degli stress residui all'interno delle singole fasi individuate sulle pareti cellulari di schiume in alluminio;
- sviluppo, e trasferimento ad ENEA, di metodologie in non-contatto per la mappatura bidimensionale ad alta risoluzione del campo di deformazione nel corso di prove meccaniche macroscopiche su pannelli sandwich caratterizzati da core in schiuma di alluminio, tramite l'utilizzo di tecniche di correlazione digitale di immagine (Digital Image Correlation, DIC).

Università Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e della Produzione

Le attività di ricerca svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e della Produzione hanno riguardato lo studio e lo sviluppo di tecnologie per la formatura di elementi in composito con matrice termoplastica e rinforzo in fibre naturali [Obiettivo D, Report RdS/2012/103].

AUSL di Viterbo U.O. Laboratorio di Igiene Industriale

Il Laboratorio di Igiene Industriale ha effettuato attività di monitoraggio ambientale presso il Laboratorio UTTEI – VEBIM durante l'effettuazione di prove di abuso su batterie al litio [Obiettivo C; Report RdS/2012/095].

GBC Sicurezza

L'attività condotta ha riguardato l'identificazione e valutazione di sicurezza dei locali da adibire a laboratorio per analisi chimiche strumentali condotte su sistemi di accumulo elettrico a base litio finalizzate all'identificazione e gestione dei pericoli durante le operazioni di test, assemblaggio e disassemblaggio, nonché l'identificazione delle necessità strumentali del laboratorio UTTEI- VEBIM del C..R Casaccia [Obiettivo C, Report RdS/2012/096].

Consorzio CALEF

Con il Consorzio è stato stipulato un contratto di ricerca per le attività connesse alla scelta e alla progettazione di un componente modulare per carrozza ferroviaria [Obiettivo E; Report RdS/2012/102].

Consorzio Procomp

Procomp ha svolto ricerche relative allo Scale up del processo e delle attrezzature per la realizzazione di materiali cellulari ibridi metallo-polimero basato su sfere/grani cave [Obiettivo F; Report RdS/2012/105].

Elenco documenti tecnici

Progetto 1.2.2
Sistemi avanzati di accumulo di energia

- M. Pasquali "Caratterizzazione elettrochimica di materiali elettrodici nanostrutturati per batterie litio-ione per applicazioni di potenza", Università di Roma Sapienza, RdS/2012/234
- C. Arbizzani, L. Damen, F. De Giorgio, M. Mastragostino, S. Monaco, F. Veronesi "Materiali catodici per batterie litio ione ad elevata energia. Sintesi dei materiali e loro caratterizzazione elettrochimica in celle da laboratorio operanti con elettroliti convenzionali", Università di Bologna, RdS/2012/235
- R. Marassi, F. Nobili, R. Tossici, M. Marinaro, A. Birrozzi, R. Raccichini "Ricerca di materiali anodici per batterie litio ione operanti in elettroliti organici convenzionali di più elevata energia rispetto a quelle sul mercato", Università di Camerino, RdS/2012/236
- P. P. Prosini, C. Cento e P. Gislon "Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali catodici con prestazioni migliorate. Screening iniziale", ENEA, RdS/2012/237
- P. P. Prosini, M. Carewska e A. Masci "Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali catodici con prestazioni migliorate. Analisi morfologica dei prodotti intermedi", ENEA, RdS/2012/238
- P.P. Prosini, A. Masci, C. Cento, M. Carewska e P. Gislon "Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali catodici con prestazioni migliorate. Analisi morfologica dei prodotti finali", ENEA, RdS/2012/239
- P. P. Prosini, C. Cento e P. Gislon,"Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali catodici con prestazioni migliorate. Test elettrochimici e valutazione tecnico-economica", ENEA, RdS/2012/240
- A. Pozio, M. Carewska, A. Masci, R. D'Amato. M. Falconieri, G.B. Appetecchi "Ricerca e sviluppo di materiali e processi per la realizzazione di materiali anodici con prestazioni migliorate. Caratterizzazione preliminare dei materiali anodici mediante analisi SEM e TGA", ENEA, RdS/2012/241
- A. Pozio, M. Carewska, M. Falconieri G.B. Appetecchi "Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali anodici con prestazioni migliorate. Test elettrochimici su anodi compositi", ENEA, RdS/2012/242
- A. Pozio, G.B. Appetecchi, "Ricerca su materiali e processi per la realizzazione di materiali anodici con prestazioni migliorate. Test elettrochimici su nanotubi di TiO_2 ottenuti mediante ossidazione di un substrato in titanio", ENEA, RdS/2012/243
- F. Alessandrini, R. Lo Presti, G.B. Appetecchi, "Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio. Definizione del design di cella", ENEA; RdS/2012/244
- M. Moreno, M. Montanino, M. Carewska, F. Alessandrini, R. Lo Presti, G.B. Appetecchi "Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio. Sviluppo di miscele elettrolitiche miste", ENEA, RdS/2012/245
- M. Montanino, M. Moreno, M. Carewska, F. Alessandrini, R. Lo Presti, G.B. Appetecchi "Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio. Caratterizzazione chimico-fisica di miscele elettrolitiche miste", ENEA, RdS/2012/246
- A. Pozio, P.P Prosini, G.B. Appetecchi "Realizzazione e prova di celle complete da laboratorio. Test elettrochimici di miscele elettrolitiche miste in semicelle e celle complete", ENEA, RdS/2012/247
- A. Cataliotti, M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo, M. Conte, G. Graditi, M. Pasquali "Progettazione di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER", Università di Palermo-ENEA, RdS/2012/248
- M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo, M. Conte, G. Graditi, M. Pasquali, "Realizzazione e prova di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER", Università di Palermo-ENEA, RdS/2012/305
- S. Barsali e R. Giglioli "Specifica tecnica della struttura funzionale e del controllo di un dispositivo con accumulo elettrochimico per i servizi di rete", Università di Pisa, RdS/2012/249
- S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli "Prove di funzionalità e di resa energetica di un impianto con accumulo per la compensazione dell'alimentazione di un sistema di trazione", Università di Pisa, RdS/2012/250
- S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli "Gestione energetica di un'abitazione mediante accumulo di energia elettrica e termica", Università di Pisa, RdS/2012/251
- M. Ceraolo e R. Giglioli "Procedure di prova per la determinazione della capacità residua in termini di "second life" degli accumulatori al Li delle auto elettriche", Università di Pisa, RdS/2012/25.
- D. Poli e R. Giglioli "Analisi dei limiti di impiego di sistemi di accumulo, non elettrochimici, dell'energia elettrica", Università di Pisa, RdS/2012/253

Progetto 1.3.1
Linea Progettuale 1 "Collaborazioni internazionali"

- O. Aronica "Rapporto di sintesi sulla partecipazioni a gruppi e comitati internazionali", ENEA, RdS/2012/131
- G. Grasso e F. Rocchi "Rapporto di analisi critica degli incidenti occorsi agli impianti di Fukushima",ENEA, RdS/2012/132

- K.Voukelatou, P.Turroni “Stress test for the nuclear power plants of European and neighboring Countries” ENEA, RdS/2012/133
- P. Turroni, N. Voukelatou “Reattore EPR – Lo stato di avanzamento dei cantieri di costruzione”, ENEA, RdS/2012/134
- S. Boarin, M. Mazzoccoli, M. E. Ricotti, C. Petrovich, M. Ciotti, J. L. Manzano, O. Aronica, C. Bustreo, G. Meneghini, I. Vignotto, G. Zollino “Rapporto “Impatto dell’energia nucleare su sostenibilità e economicità per varie opzioni di mix energetici”, ENEA, RdS/2012/135
- C. Bustreo, G.Meneghini, I. Vignotto, G.Zollino “Rapporto sull’impatto dell’energia nucleare su sostenibilità ed economicità per varie opzioni di mix energetici, scenari economici”, CIRTEN, RdS/2012/155
- S. Boarin, M. Mazzoccoli, M. E. Ricott “Impatto dell’energia nucleare su sostenibilità e economicità per varie opzioni di mix energetici, studio delle variabili macroscopiche energetico-ambientali”, CIRTEN , RdS/2012/156
- M. Cappelli, C. Lombardo, M. Lanfredini, M. Cherubini, F. D'Auria, P. Chiovaro, S. Arrico, P.A. Di Malo, F. Mascari, I. Moscato. G. Vella “Set documentale relativo alle attività nel campo della sicurezza nucleare realizzate in collaborazione con IRSN” ENEA, RdS/2012/136
- Mauro Cappelli “Attività analitiche a supporto del progetto di canali sperimentali ed esperimenti per Jules Horowitz Reactor (JHR)”, ENEA, RdS/2012/137
- Massimo E. Angiolini “Sviluppo di un codice di calcolo per valutare la resistenza a carichi termici di rivestimenti depositati su acciaio esposti a piombo liquido”, ENEA, RdS/2012/138
- Mauro Cappelli “Completamento infrastrutture elettriche ed idrauliche per un impianto ad alta pressione per simulazioni termoidrauliche”, ENEA, RdS/2012/139
- D. Bernardi “Simulazione dell’effetto di warm-prestressing su provini cruciformi”, ENEA, RdS/2012/140
- G. M. Giannuzzi “Aspetti teorici connessi con accoppiamento termo-idro-meccanico in calcestruzzi sottoposti a carico termico e selezione degli algoritmi numerici da implementare in linguaggio Gibiane nel codice CAST3M”, ENEA, RdS/2012/141
- C. Parisi “Studio di fattibilità di modelli di simulazione per studi su reattori a sodio”, ENEA, RdS/2012/142
- M.E. Ricotti, S. Boarin, M. Cappelli “Reattori di piccola/media taglia. Possibili sviluppi e collaborazioni”, ENEA, RdS/2012/143
- P. Chiovaro, S. D'Amico, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella “Analisi incidentali deterministiche e utilizzo di simulatori di impianto a supporto delle verifiche di sicurezza. Sviluppo e messa a punto di un modello di un impianto PWR (EPR like) per preliminari analisi con il codice TRACE di eventi di Station Blackout”, CIRTEN, RdS/2012/157
- M. Lanfredini, M. Cherubini, F. D’Auria “Station blackout analysis: Typical PWR response and investigation on possible operator actions”, CIRTEN, RdS/2012/158
- P. C. Camprini, C. Artioli, M. Sumini, F. Teodori, C. Gonnier, B. Pouchin, S. Bourdon “Progettazione neutronica e termo-fluidodinamica di canali sperimentali di reattori di ricerca”, CIRTEN, RdS/2012/159
- S. Di Gennaro, B. Castillo-Toledo, F. Memmi “Studio e analisi di sistemi di controllo implementabili con logiche program-mabili per il miglioramento delle prestazioni e della sicurezza di impianti nucleari di nuova concezione”, Università dell’Aquila, RdS/2012/160
- S. Di Gennaro, B. Castillo-Toledo, F. Memmi “Sistema di simulazione di logiche di controllo per il miglioramento delle prestazioni e della sicurezza di impianti nucleari di nuova concezione”, Università dell’Aquila, RdS/2012/161
- M.E. Ricotti, S. Boarin “Collaborazioni internazionali per studi su Small Modular Reactors (SMR)”, CIRTEN, RdS/2012/162
- M. Ciotti “Raccolta delle relazioni di partecipazione ai comitati e gruppi internazionali sul nucleare da fissione”, ENEA, RdS/2012/144
- R. Coppola “Contributo a EERA su caratterizzazione materiali mediante diffusione e diffrazione neutronica”, ENEA, RdS/2012/145
- F. Vettraino, M. Ricotti “Rapporto di avanzamento sullo sviluppo NESA_Italy (Fase I)”, ENEA, RdS/2012/146
- M. Cappelli, A. Del Nevo, D. Rozzia, G. Gola, M. Lind “Rapporto “Programma di collaborazione ENEA-HRP”, ENEARdS/2012/147
- A. Grossi “Misure di grandezze macroscopiche per la verifica di modelli codici e dati nucleari in reattori di ricerca”, ENEA, RdS/2012/148
- C. Innarella “Il modello dinamico del reattore nucleare TRIGA RC-I dell'ENEA “, ENEA, RdS/2012/149
- F. Pisacane, S. Loreti, M. Amendola “Misure assolute di emissione neutronica mediante bagno di solfato di manganese - rapporto sulle attività teorico-sperimentali in ENEA”, ENEA, RdS/2012/150
- F. Fiori, P. Mariani, F. Spinozzi “Caratterizzazione di materiali nucleari tramite analisi dati misure diffusione e diffrazione neutronica”, Università Politecnica delle Marche, RdS/2012/163
- F. Mascari, G. Vella “Prosecuzione della Partecipazione a Comitati e Gruppi Internazionali”, CIRTEN, RdS/2012/164
- F. Vettraino, M. E. Ricotti “Sviluppo di un NESA di interesse nazionale (Fase 1)”, CIRTEN, RdS/2012/165
- F. Cantini, M. Cherubini, D. Lazzerini, F. D’Auria “Test su combustibili e materiali avanzati presso HRP”, CIRTEN, RdS/2012/166
- D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, G. Magrotti, S. Manera, F. Panza, M. Prata, A. Salvin, A. Borio “Validazione di una metodologia per lo studio del burn-up del combustibile nucleare”, Università di Pavia, RdS/2012/167

- F. Padoani, G. Glinatsis “Sviluppi metodologici e attività internazionali per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi nucleari innovativi”, ENEA, RdS/2012/151
- A. Cesana , G. Glinatsis , G.L. Raselli “Aspetti critici della gestione degli Attinidi Minori attraverso irraggiamento neutronico” ENEA, RdS/2012/152
- A. Ventura “Sviluppo di modelli avanzati di fissione nucleare e loro applicazioni agli attinidi minori”, ENEA, RdS/2012/153
- F. Padoani, R. Bove, F. Rossi “Considerazioni e aspetti normativi dell’interfaccia safety e security nucleare”, ENEARdS/2012/154
- A. Cesana “Rivisitazione critica e riprogettazione dell’esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di ^{241}Am, indirizzata verso spettri veloci”, CIRTEN, RdS/2012/168
- G.L. Raselli “Rivisitazione critica e riprogettazione dell’esperienza di irraggiamento neutronico di campioni di 241Am, indirizzata verso spettri veloci”,Università di Pavia, RdS/2012/169

Linea progettuale 2 “Studi di sicurezza sugli impianti nucleari”

- M. Pescarini, V. Sinitsa, R. Orsi, M. Frisoni “VITENDF70.BOLIB - An ENEA-Bologna Fine-Group Coupled (199 n + 42 γ) Cross Section Library in AMPX Format Based on ENDF/B-VII.0 Data”, ENEA, RdS/2012/01
- G. Glinatsis, G. Grasso, R. Pergreffi, F. Rocchi “Utilizzo di Apollo-Cronos per calcoli di criticità e di ciclo”, ENEA, RdS/2012/04
- R. Pergreffi, F. Rocchi, M. Sumini, A. Guglielmelli “Calcoli per la determinazione della composizione isotopica del combustibile di un PWR da 900 MWe al variare del bruciamento”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/06
- A. Guglielmelli, F. Rocchi “Metodologia per la determinazione e la sistematizzazione di inventari di combustibile: messa a punto dei metodi ed applicazione ad alcune tipologie di LWR”, ENEA,RdS/2012/05
- K. W. Burn “Continuing Analysis with Monte Carlo Techniques of the Impact of the Heavy Reflector of a Typical Large Size GEN III+ Reactor Design on Some Safety Features: Completion of the Ex-Core Detector Calculations from PAR2010 and Examination of the Impact on the Phenomenon of Flux Tilt”, ENEA, RdS/2012/03
- K. W. Burn “Development of Monte Carlo Algorithms for Eigenvalue Calculations”, ENEA, RdS/2012/02
- F. Donato, C. Lombardo, M. Polidori, F. Bassenghi, G. Bornia, S. Manservisi, R. Scardonelli “Optimization and validation of the CFD modules in the NURISP Platform”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/07
- G. Bandini, S. Ederli “Sviluppo e validazione di metodi e strumenti per le analisi di sicurezza: Modellistica e codici per l'analisi di incidenti severi”, ENEA, RdS/2012/08
- N. Davidovich, F. De Rosa, M. Sangiorgi, K. Voukelatou, M. Sumini, F. Teodori, M. Di Giuli, W. Ambrosini, S. Paci, G. Mazzini, A. Manfredini “Benchmark di validazione dell’esperimento PHEBUS FPT3 con i codici MELCOR 2.1 e ASTEC v2.2”, ENEA - CIRTEN, RdS/2012/09
- W. Ambrosini, A. Manfredini, F. De Rosa, M. Sangiorgi “Valutazione deterministica di una sequenza incidentale che possa indurre condizioni di incidente severo e degli effetti derivanti da eventi esterni” ENEA-CIRTEN, RdS/2012/010
- L. Burgazzi, N. Davidovich, M. Sangiorgi, P. Turroni, K. Voukelatou, F. Giannetti, L. Ferroni, T. Murgia, A. Naviglio “Valutazione della risposta di sistemi attivi e passivi a fronte di sequenze incidentali rilevanti ai fini della sicurezza”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/011
- P. Turroni, N. Davidovich, M. Sangiorgi, K. Voukelatou “SMR-Rassegna aggiornata di alcuni progetti di interesse e valutazioni alla luce dell'evento di Fukushima”, ENEA, RdS/2012/012
- G. Forasassi, R. Lo Frano, V. Baudanza F. Orlandi “Valutazione del comportamento incidentale di reattori SMR”, CIRTEN, RdS/2012/013
- A. Del Nevo “Deterministic safety analysis of Station Blackout postulated accident on the basis of the SMR simulator MASLWR”, ENEA, RdS/2012/014
- M. D’Apice, C. Innarella, M. Serra, G. Di Costanzo, A. Tripi, C. Parisi, N. Muellner, M. Cherubini “Progettazione simulatori incidentali per sistemi integrati di gestione di incidenti nucleari”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/015
- M. D’Apice, C. Innarella, M. Serra, G. Di Costanzo, A. Tripi, C. Parisi, M. Cappelli, S. Lorenzi, A. Cammi “Progettazione di massima di simulatori di ingegneria avanzati ENEA-CIRTEN, RdS/2012/016
- R. Ferri “SPES3 facility: RELAP5 simulations, from 65% power, of the DBE DVI line split break, BDBE EBT top line DEG break, Fukushima type SBO, for design support”, SIET, RdS/2012/017
- M. Boni, O. De Pace, S. Gandolfi “Verifica sperimentale di prototipi di elementi scaldanti per l’impianto SPES-3 - Barre THERMOCOAX”, SIET, RdS/2012/018
- I. Angelo, V. Baudanza, N. Forgione, D. Martelli “Characterization and validation of thermal and boron mixing phenomena in the downcomer and lower plenum of an integrated primary system nuclear reactor”, CIRTEN, RdS/2012/019
- M. Colombo, A. Cammi, J. De Amicis, M.E. Ricotti “Rapporto Tecnico sul comportamento di miscele bifase in generatori di vapore a tubi elicoidali con diverse geometrie ed in soluzioni alternative”, CIRTEN, RdS/2012/020
- C. Randaccio “Prove a caldo di una sonda capacitiva per la misura del grado di vuoto in miscela bifase”, SIET, RdS/2012/021
- C. Randaccio “Spool piece per la misura di portata di fluido bifase: misura di quantità di moto e di velocità”, SIET, RdS/2012/022
- M. De Salve ,G. Monni, B. Panella “Analisi delle prestazioni di uno Spool Piece, costituito da Venturi classico e Wire Mesh Sensor, in deflusso orizzontale bifase aria-acqua”, CIRTEN, RdS/2012/023

- R. Ferri, A. Achilli, C. Congiu “Feasibility study for the execution of a boron dilution test on the SPES-2 facility”, SIET, RdS/2012/024
- A. Achilli, S. Gandolfi “Relazione tecnica su sostituzione strumentazione obsolete ed attività di manutenzione per impianto SPES2”, SIET, RdS/2012/025
- F. Donato, C. Lombardo, P. Chiovaro, S. D' Amico, P.A. Di Maio, F. Mascari, I. Moscato, G. Vella “Analisi preliminari per la simulazione di un incidente tipo Fukushima su SPES2”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/026
- B. Ferrucci, R. Levizzari “Applicazione modellistica mediante il codice AMBER per la safety assessment di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi di seconda categoria”, ENEA, RdS/2012/027
- E. Zio , F. Cadini, J. De Sanctis “Performance Assessment di Depositi Geologici per il confinamento di rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita e relativa modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive”, CIRTEN, RdS/2012/028
- R. Levizzari, A. Luce, A. Rizzo “Partecipazione a IGD-TP – Stato dei lavori e prospettive per le future attività di R&S”, ENEA, RdS/2012/029
- G. Forasassi, R. Lo Frano, G. Pugliese, V. Baudanza “Preliminary evaluation of an aircraft impact on a surface RWs disposal facility”, CIRTEN, RdS/2012/030
- M. De Salve, R. Testoni, P. Bartolomei, R. Levizzari, A. Luce, E. Nava, A. Rizzo, F. Troiani “Il monitoraggio ambientale nei depositi di rifiuti radioattivi per le valutazioni di impatto ambientale e di Safety Assessment”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/031
- M. De Salve, R. Testoni “Trasporto e migrazione dei radionuclidi dei depositi di rifiuti radioattivi: strumenti per la simulazione e il monitoraggio ambientale”, CIRTEN, RdS/2012/032
- C. Andreozzi, P. Bartolomei, R. Lorenzelli, E. Nava, A. Piccoli, A. Rizzo, S. Salvi, J. De Sanctis, M. Ferrando, M. Poli ”Monitoraggio del deposito dei rifiuti radioattivi: Confronto tra metodiche analitiche radiometriche, spettrometriche e spettroscopiche classiche ed avanzate, per l’identificazione ed analisi degli isotopi mobili”, ENEA, RdS/2012/033
- R. Remetti, M. Giangregorio “Studio del trasporto e diffusione di inquinanti radioattivi nel suolo e sottosuolo”, CIRTEN, RdS/2012/034
- M. Capone, N. Cherubini “Metodologie di caratterizzazione radiologica per rifiuti contenenti radionuclidi di difficile rivelabilità”, ENEA, RdS/2012/217
- A. Compagno, A. Dodaro, F. D’Errico “Studio di rivelatori di neutroni “Boron Coated” come alternativi ai contatori proporzionali a 3He”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/218
- G. De Angelis, C. Fedeli, G. Giorgiantoni, M. Olivetti, M. Da Ros, F. Giacobbo, M. Giola, E. Macerata, M. Mariani ”Condizionamento di rifiuti radioattivi in matrici vetro-ceramiche e studio delle interazioni rifiuto-terreno”, ENEA-CIRTEN,RdS/2012/219

Linea progettuale 3 “Reattori di IV Generazione”

- R. Bonifetto, S. Dulla, L. Savoldi Richard, P. Ravetto, R. Zanino, M. Carta “Sviluppo di un codice di cinetica spaziale di nocciolo per sistemi LFR”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/035
- A. Gandini, A. Naviglio, V. Peluso “Attività di sviluppo, validazione e benchmarking del codice ERANOS”, CIRTEN, RdS/2012/036
- A. Gandini, L. Cretara, F. Giannetti, M. Frullini, V. Peluso “Attività di analisi di sensitività con metodologie GPT applicata a noccioli critici e sottocritici raffreddati a piombo”, CIRTEN, RdS/2012/037
- G. Bornia, D. Cerroni, S. Manservisi, M. Polidori, F. Donato “FEM-LCORE code: parallelization, turbulence models and code integration”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/039
- R. Bonifetto, L. Savoldi Richard, R. Zanino ”Validation of a 1D+2D thermal-hydraulic module against Circe experimental data” CIRTEN, RdS/2012/040
- C. Artioli, A. Cammi, G. Grasso, S. Lorenzi, D. Mattioli, R. Pergreffi, C. Petrovich, F. Rocchi, M. Sumini, P. Turroni “Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico e termomeccanico”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/041
- N. Burgio, A. Santagata, M. Frullini, F. La Stella, F. Garofalo, C. Rusconi “Reinterpretation of the Late SCK-CEN/ENEA experimental neutronic campaign on TAPIRO Fast Reactor with MCNPX Monte Carlo transport code”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/042
- A. Bellucci “ Ricoprimenti per materiali strutturali per sistemi nucleari refrigerati a piombo”, ENEA, RdS/2012/043
- S. Matera, L. Alleva, O. Tassa “EP302 Stainless Steel Procurement”, ENEA, RdS/2012/044
- S. De Vrieze, N. De Wispelaere “15x15 Ti production and procurement”, ENEA, RdS/2012/045
- M. Tarantino, S. Storai, M. Granieri “Fornitura macchina per prove di fretting GIORDI”, ENEA, RdS/2012/046
- F. Nanni, I. Cacciotti, F.R. Lamastra “Caratterizzazione di rivestimenti PVD di TiN, FeAl, FeCrAl su substrati metallici”, Università di Tor Vergata, RdS/2012/047
- P. Turroni “Progetto concettuale e di dettaglio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR”, ENEA, RdS/2012/038
- E. Ghisolfi “Rapporto Tecnico di fine fabbricazione e assemblaggio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR”, FN, RdS/2012/048

- A. Gessi ”Specifica tecnica di fornitura e set-documentale relativo all’approvvigionamento di una macchina di Detonation Spray per la realizzazione di coating su materiali strutturali”, ENEA, RdS/2012/049
- D. Rozzia, D. Martelli, N. Forgione, M. Moretti, A. Naviglio, D. Vitale Di Maio, A Del Nevo, M. Tarantino “Activities in support to the Assessment of Steam Generator Bayonet Tubes, for GEN-IV Applications”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/050
- I. Di Piazza, G. Galgani, M. Tarantino “Identificazione di un sistema di misura non intrusivo per i profili di velocità in piombo. Specifica tecnica di fornitura e documentazione relativa alla installazione e collaudo”, ENEA, RdS/2012/051
- L. Mengali, M. Lanfredini, F. Moretti, F. D’Auria “Stato dell’arte sull’accoppiamento fra codici di sistema e di fluidodinamica computazionale. Applicazione generale su sistemi a metallo liquido pesante”, CIRTEN, RdS/2012/052
- M. Tarantino, P. Gaggini, L. Cinotti “Specifica di prova per la caratterizzazione in regime transitorio del sistema DHR prototipico”, ENEA, RdS/2012/055
- A. Del Nevo, P. Gaggini, M. Tarantino “Post test analysis of ICE tests”, ENEA, RdS/2012/056
- N. Forgione, D. Martelli “Numerical analysis of the thermal-hydraulic behaviour of the ICE test section by the coupling of a system code and a CFD code”, CIRTEN,RdS/2012/057
- I. Di Piazza, P. Gaggini, A. Del Nevo, M. Tarantino “CIRCE Experimental set-up and test matrix definition”, ENEA, RdS/2012/200
- G. Barone, N. Forgione, D. Martelli, A. Del Nevo “Pre-test analysis of thermal-hydraulic behaviour of the NACIE facility for the characterization of a fuel pin bundle”, CIRTEN, RdS/2012/058
- M. Tarantino, V. Sermenghi “Sistema di alimentazione e controllo potenza impianto NACIE”, ENEA, RdS/2012/059
- I. Di Piazza, P. Gaggini, M. Tarantino “Scambiatore di calore impianto NACIE”, ENEA, RdS/2012/201
- I. Di Piazza, P. Gaggini, M. Granieri, M. Tarantino ”Fornitura, installazione e collaudo dell’impianto a metallo liquido pesante HELENA”, ENEA, RdS/2012/060
- I. Di Piazza, M. Granieri, M. Tarantino “Verbale montaggio e riempimento polveri HX impianto HELENA”, ENEA, RdS/2012/061
- A. Gessi ”Concettualizzazione del sistema di regolazione e controllo dell’ossigeno disciolto in sistemi nucleari a piscina refrigerati a Piombo”, ENEA, RdS/2012/062
- M. Tarantino “Sviluppo e qualifica di sonde per il monitoraggio dell’ossigeno disciolto in sistemi nucleari a piscina refrigerati a piombo”, ENEA, RdS/2012/063
- M. Mariani, E. Macerata, E. Mossini, M. Negrin, M. Giola “Studio preliminare dell’interazione Fuel-Coolant in Reattori LFR: applicazione di un codice di calcolo”, CIRTEN, RdS/2012/064
- A. Gessi “Studio delle interazioni ad elevata temperatura tra la guaina di combustibile e refrigerante in un sistema LFR”, ENEA, RdS/2012/065
- G. De Angelis, G. Abbate, C. Fedeli “Analisi di fattibilità per prove di interazione chimica tra refrigerante e combustibile nei laboratori della Casaccia”, ENEA, RdS/2012/066
- G. Abbate “Valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato di un sistema LFR”, ENEA, RdS/2012/067
- M. Cherubini, D. Lazzerini, F. D’Auria “Methodology for the evaluation of fission gas release in Lead Fast Reactor”, CIRTEN, RdS/2012/232
- G. De Angelis, M. De Salve “Progetto concettuale e studio di fattibilità di una apparecchiatura sperimentale per la caratterizzazione del rilascio e migrazione dei prodotti di fissione in un sistema LFR. Specifica di prova”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/068
- M. Eboli, I. Angelo, N. Forgione, G. Bandini “Loss of core integrity in a LFR system: models and preliminary numerical analysis”, ENEA-CIRTEN, RdS/2012/069
- I. Di Piazza, M. Scarpa “Fuel Assembly flow blockage in a LFR reactor core: CFD modelling and preliminary numerical analysis”, ENEA, RdS/2012/070
- I. Di Piazza “Freezing of the LFR primary pool: CFD modelling and preliminary analysis on prototypical configurations”, ENEA, RdS/2012/071
- G. Forasassi, R. Lo Frano ”Preliminary evaluation of the Fluid-Structure Interaction effects in a LFR”, CIRTEN, RdS/2012/072
- G. De Angelis, M. Capone, C. Fedeli, G. Tiranti, E. Baicchi “Valutazione della fattibilità di un processo a sali fusi per il recupero degli attinidi dal combustibile MOX”, ENEA, RdS/2012/073

Progetto 1.3.2
Fusione nucleare: Attività di fisica della fusione complementari a ITER

- G. M. Polli, A. Cucchiaro “Advances in the manufactirng activities for the supply of 9 TF coils of JT-60SA Tokamak and associated validation program”, ENEA, RdS/2012/254
- A. Cucchiaro, P. Rossi, L. Di Pace, G. Brolatti “Documenti tecnici contrattuali per la realizzazione delle 18 casse di contenimento di JT-60SA”, ENEA, RdS/2012/255
- A. Cucchiaro, P. Rossi, L. Di Pace, G. Brolatti “Stato delle attività contrattuali per la realizzazione delle 18 casse di contenimento di JT-60SA”, ENEA, RdS/2012/256

- A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace “Fornitura di 4 sistemi di commutazione Switching Network Unit per la macchina sperimentale tokamak JT-60SA”, ENEA, RdS/2012/257
- P. Costa, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace “Attività finalizzate alla fornitura di 8 alimentatori AC/DC per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina sperimentale tokamak JT-60SA”, ENEA, RdS/2012/258
- S. Mannori “Aggiornamento dei sistemi di monitoraggio delle impurità del litio e del sistema di rilevazione e misura della cavitazione“, ENEA, RdS/2012/259
- A. Aiello, S. Mannori, P.Favuzza, A. Tincani, M. Muzzarelli, G. Fasano “Rapporto di dettaglio sulla progettazione e realizzazione dell’impianto LiFus6 per prove di corrosione da litio”, ENEA, RdS/2012/260
- P. Favuzza, A. Aiello, S. Mannori, M. Muzzarelli “Rapporto di dettaglio sulla progettazione e realizzazione del sistema di purificazione dell’impianto LiFus6”; ENEA, RdS/2012/261
- G. Miccichè, D. Bernardi “Rapporto sulla progettazione dei sistemi di connessione rapida per tubazioni denominati FDS”, ENEA, RdS/2012/262
- G. Miccichè, L. Lorenzelli “Rapporto sull’adeguamento dell’area sperimentale destinata alle sperimentazioni full scale in condizioni rappresentative del target IFMIF”, ENEA, RdS/2012/263
- G. Miccichè “Rapporto sulla progettazione delle procedure di remote handling per il Target assembly di IFMIF”, ENEA, RdS/2012/264
- D. Bernardi, M. Frisoni , G. Miccichè, T. Pinna, M.T. Porfiri, M.Serra “Rapporto preliminare del progetto del target di IFMIF comprensivo di disegni, analisi numeriche e valutazione dei costi”, ENEA, RdS/2012/265
- E. Ferrari, S. Baccaro “Realizzazione di pannelli e campioni in SiCf/SiC per caratterizzazioni fisico-meccaniche”, FN, RdS/2012/266
- E. Ferrari, S. Baccaro “Realizzazione di pannelli e campioni in SiCf/SiC per caratterizzazioni fisico-meccaniche”, FN, RdS/2012/267
- A. Moriani “Development of a multi-scale methodology for composite structural modelling and validation of modelling procedure by mechanical testing - Final Report”, RdS/2012/268
- S. Tosti, A. Moriani, F. Marini “Erosion/corrosion of SiC and SiC/SiC in liquid metal - First Report”, RdS/2012/269
- G. Di Gironimo, C. Labate, R. Mozzillo, F. Renno “ Studio della camera per il plasma, delle bobine e del sistema di remote handling per la macchina FAST”, Consorzio CREATE, RdS/2012/270

Progetto 2.1.2
Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse e scarti

- F. Micheli, K. Gallucci, P. U. Foscolo “Studio della valorizzazione dell’impianto di gassificazione di biomasse a letto fluidizzato internamente ricircolante per la produzione di metano. Studio sperimentale della purificazione finale del metano”, Università dell’Aquila, RdS/2012/285
- G. Carucci, G. Giordano, E. Massi, A. Polettini, R. Pomi “Confronto fra sistemi di digestione anaerobica in doppio stadio per la produzione combinata di H_2 e CH_4 e processi convenzionali per la produzione di solo CH_4 da residui organici biodegradabili”, Università di Roma Sapienza, RdS/2012/286
- M. Migliori, G. Giordano “Analisi termodinamica e sostenibilità energetica della gassificazione di biomasse in acqua supercritica”, Università della Calabria, RdS/2012/287
- L. Ansaloni, M. Giacinti Baschetti, M. G. De Angelis, G. C. Sarti “Studio e caratterizzazione sperimentale di membrane polimeriche per l’arricchimento in metano del biogas”, Università di Bologna, RdS/2012/288
- V. Calabrò, A. Basile, S. Curcio, A. Gugliuzza, A. Iulianelli, S. Liguori “Sviluppo di membrane polimeriche innovative e caratterizzazione sperimentale delle stesse e di membrane ceramiche per l’arricchimento in metano del biogas” Università della Calabria, RdS/2012/289
- A. Aquilanti, P. Barghini, S. Silvi, M. Fenice “drolisi di materiale lignocellulosico per l’ottenimento di substrati idonei alla produzione di idrogeno” Università della Tuscia, RdS 2012/290
- M. Migliori, G. Giordano “Produzione e caratterizzazione di catalizzatori bimetallici a supporto del processo di gassificazione con acqua in condizioni supercritiche”, Università della Calabria, RdS/2012/291
- -C. Amelio, L. Mannarino, S. Fassina, V. Naticchioni, G. Porotto, G. Cuccuru “Sviluppo e caratterizzazione di membrane ceramiche e studio di supporti ceramici per l’abbattimento degli inquinanti nei fumi di combustione della biomassa solida lignocellulosica”, FN, RdS/2012/292
- V. Palma, D. Barba “ Preparazione di catalizzatori strutturati per l’ossidazione parziale selettiva di H_2S in biogas” Università di Salerno, RdS/2012/293
- P. Gislon, S. Galli, G. Monteleone “Abbattimento degli inquinanti dal biogas: rimozione dei silossani mediante carboni attivi”, ENEA, RdS/2012/294
- G. Stoppiello “Prove sperimentali su dispositivi ceramici porosi per la rimozione catalitica delle sostanze inquinanti in impianti di combustione a biomassa”, ENEA, RdS/2012/295
- A. Molino, D. Barisano “Sviluppo di una unità prototipale per la metanazione del syngas ed avvio della sperimentazione”, ENEA, RdS/2012/296

- A. Molino “Stato dell’arte industriale della gassificazione con acqua in condizioni supercritiche e potenzialità di applicazioni per il territorio nazionale, con individuazione delle principali materie convertibili”, ENEA, RdS/2012/297
- A. Molino, F. Nanna, P. Iovane ” Test sperimentali con moduli di membrane polimeriche commerciali di tipo hollow fiber e polimero peek: ottimizzazione dei processi chimico-fisici di abbattimento degli inquinanti e upgrading del biogas a biometano”, ENEA, RdS/2012/298
- A. Molino, F. Nanna, A. Villone “Trattamenti idrotermici delle biomasse in condizioni sub-critiche: risultati sperimentali con biomasse lignocellulosiche e model compound“, ENEA, RdS/2012/299
- S. Scarfogliero “Aggiornamento, collaudo e rilascio della Piattaforma Web A.I.D.A.” Università di Napoli Federico II, RdS/2012/300
- M. C. Annesini, R. Augelletti, I. Fabriani, M. A. Murmura, L. Turchetti “Analisi tecnico-economica del processo di upgrading del biogas mediante Pressure Swing Adsorption” Università di Roma Sapienza, RdS/2012/301
- L.Turchetti, C. Colonna, V. Naticchioni, G. Monteleone “Studio sperimentale dei processi di rimozione dell’H_2S da una corrente di biogas simulato in colonna a letto fisso”, Università Campus Biomedico di Roma, RdS/2012/302
- Debora Fino, Nunzio Russo “Studio sui sistemi catalitici di trattamento dei fumi provenienti dalla combustione di biomasse lignocellulosiche per impianti cogenerativi di piccola-media taglia” Politecnico di Torino, RdS/2012/086
- A. Aliboni, E. De Luca, M. De Mei, F. De Poli., F. Fiocchetti, G. Izzo., A. Marone, G. Massini, L. Mentuccia, C. Patriarca, S. Rosa, S. Sau, A. Signorini, C. Varrone “ Valorizzazione bioenergetica di scarti agrozootecnici, ENEA , RdS/2012/304

Progetto 2.1.4
Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

- A. Aronne, M.L. Addonizio, O. Tari, P. Pernice, S. Daliento, E. Fanelli “Sintesi via sol-gel di ossidi trasparenti e conduttivi a base di ZnO per applicazioni fotovoltaiche”, Università di Napoli Federico II - ENEA, RdS/2012/210
- A. Micco, G. Quero, A. Ricciardi, M. Pisco, A. Cusanom V. La Ferrara, A. Pacheri Madathil, T. Polichetti “Validazione sperimentale e ottimizzazione di 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 - ENEA, RdS/2012/211
- F. Buatier de Mongeot, C. Martella, M. Giordano, C.Mennucci’ L.V. Mercaldo, E. M. Esposito, I. Usatii, P. Delli Veneri “Photon harvesting from nanostructured metallo-dielectric substrates”, Università di Genova - ENEA, RdS/2012/212
- F. Biccari, C. Malerba, M. Valentini, C. Azanza , R. Chierchia, P. Mangiapane, E. Salza, G. Arabito, A. Santoni, L. Mannarino, M. Capizzi, P. Scardi, A. Mittiga “Ottimizzazione dei processi di realizzazione di dispositivi fotovoltaici in film sottili di Cu_2ZnSnS_4”, ENEA - Università di Trento - Università di Roma Sapienza - FN S.p.A, RdS/2012/213
- C. De Rosa, F. Auriemma, C. Diletto, P. Morvillo “Materiali polimerici nanostrutturati per il controllo della morfologia su scala nanometrica, Università di Napoli Federico II - ENEA, RdS/2012/214
- A. Mucci, F. Parenti, L. Schenetti, R. Diana, P. Morvillo “Sintesi di nuovi polimeri semiconduttori a bassa gap per celle fotovoltaiche organiche”, Università di Modena e Reggio Emilia - ENEA, RdS/2012/215
- P. Maddalena, S. Lettieri, M.G. Maglione, R. Rega, A. Grimaldi, P. Morvillo, P. Tassini "Studio e caratterizzazione di materiali organici per applicazioni fotovoltaiche organiche tramite metodi di spettroscopia ottica avanzata", Università di Napoli “Federico II” - ENEA, RdS/2012/216

Progetto 2.1.8
Studi e valutazioni sul potenziale energetico delle correnti marine e moto ondos

- A. Carillo A. Bargagli , R. Iacono, E. Caiaffa, G. Sannino “Stima del potenziale potenziale energetico associato al moto ondoso in regioni campioni della costa italiana”, ENEA, RdS/2012/170
- A. Bargagli, E. Caiaffa, G. Sannino “Modello di circolazione dello stretto di Messina”, ENEA RdS/2012/171
- D. P. Coiro, G. Troise “ Stima della produzione energetica da correnti marine nello Stretto di Messina”, Università di Napoli Federico II, RdS/2012/172
- G. Mattiazzo, E. Giorcell, D. Poggi “Valutazione della produttività di sistemi attivi su struttura galleggiante per la generazione di energia da moto ondoso”, Politecnico di Torino, RdS/2012/173
- F. Arena, A. Romolo, V. Laface , G. Malara, A. Viviano “Analisi di fattibilità di impianti di tipo REWEC3 (o U-OWC) per la produzione di energia elettrica da moto ondoso in aree campione lungo le coste italiane**”,** Università Mediterranea di Reggio Calabria, RdS/2012/231

Progetto 2.2

- P. Deiana, C. Bassano, M. Subrizzi "Attività sulla gassificazione del carbone", ENEA, RdS/2012/174
- G. Calì, F. Tedde, M.Caboni, P.Miraglia, A.Madeddu, M.Fadda "Modifiche e migliorie degli impianti per la gassificazione del carbone", Sotacarbo, RdS/2012/175
- G. Cutrufello, E. Rombi, R. Monaci, I. Ferino, M. Mureddu, C. Cannas, A.Musinu, G.Piccaliga "Sintesi e sperimentazione di materiali innovativi per il trattamento del syngas da carbone ", Università di Cagliari, RdS/2012/176
- B. de Caprariis, P. De Filippis, M.Scarsella, N.Verdone "Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo di abbattimento del tar ", Università di Roma Sapienza, RdS/2012/177
- A. Orsini, A. Plaisant, A. Madeddu, M. Fadda, R. Cara, E. Loria "Acquisizione e prima sperimentazione di un nuovo sistema di analisi syngas", Sotacarbo, RdS/2012/182
- A. Plaisant, A. Orsini, R. Cara "Caratterizzazione dei sistemi di campionamento e analisi a supporto della attività di impianto", Sotacarbo, RdS/2012/220
- A. Pettinau, M. Caboni, G. Calì, F. Tedde, A. Madeddu, D. Multineddu, C. Frau "Test sperimentali di gassificazione e co-gassificazione di carbone e biomasse presso la piattaforma pilota Sotacarbo", Sotacarbo, RdS/2012/221
- M. Caboni, G. Calì, P. Miraglia, F. edde "Sperimentazione dei sistemi di pulizia e trattamento del syngas", Sotacarbo, RdS/2012/222
- P. Miraglia, D. Multineddu, G. Calì, F. Tedde "Produzione di energia elettrica e idrogeno", Sotacarbo, RdS/2012/223
- A. Calabrò, S. Stendardo, I .Cassani "Realizzazione di un impianto di pirolisi e gassificazione di combustibili solidi per la produzione di syngas ad alto contenuto di idrogeno e basso impatto ambientale", ENEA, RdS/2012/178
- S. Cassani, L. Pagliari, P. Garzone, I. Cassani "Studio del processo di devolatilizzazione del carbone Sulcis. Primi risultati", ENEA ,RdS/2012/179
- S. Scaccia "Reattività di gassificazione di residuo di pirolisi del carbone Sulcis per produzione di gas", ENEA, RdS/2012/180
- C. Bassano, P. Deiana "Modellazione ed analisi tecnico economica di un impianto Coal to Liquid integrato con tecnologie CCS", ENEA, RdS/2012/181
- M. Martinelli, C.G. Visconti, L. Lietti, P. Forzatti " Studi e sperimentazione del processo di produzione di combustibili liquidi da carbone", Politecnico di Milano, RdS/2012/183
- S. Stendardo, L. Pagliari, S. Cassani, M. Nobili, G. Messina, C, Stringola, G. Spinelli, P.U. Foscolo "Avviamento del gassificatore della piattaforma Zecomix: fluidizzazione della fase di sostegno", ENEA - Università de L'Aquila, RdS/2012/184
- S. Stendardo, P.U. Foscolo "Implementazione in ambiente ChemCad di un modulo per la simulazione di un reattore a letto fluidizzato", ENEA - Università de L'Aquila, RdS/2012/185
- O.D. Beltramba, K. Gallucci, P.U. Foscolo "Studio sperimentale delle proprietà catalitiche dell'olivina in un gassificatore a letto fluidizzato: influenza del trattamento termico ", Università de L'Aquila, RdS/2012/186
- F. Micheli, K. Gallucci, S. Stendardo, P.U. Foscolo "Caratterizzazione di sorbenti a base di calcio: idrotalciti e ossido di calcio su mayenite", ENEA - Università de L'Aquila, RdS/2012/228
- V. Barbarossa; G. Vanga "Assorbimento di CO_2 con soluzioni alcaline di resorcinolo", ENEA; RdS/2012/195
- F.Ferrara, G.Calì, M.Caboni, E.Maggio, D.Multineddu, A.Pettinau "Sperimentazione dei processi di separazione della CO_2 con ammine", Sotacarbo, RdS/2012/187
- G. Calì, M. Caboni, F Ferrara, F. Tedde, C. Frau, E. Loria "Sperimentazione della rigenerazione dei solventi a base di ammine", Sotacarbo, RdS/2012/188
- S. Lai, F. Mani, S. Seniori Costantini, P. Stoppioni "Indagini sperimentali sulla cattura di CO_2 con nuovi metodi a basso consumo energetico" Università di Firenze, RdS/2012/190
- R. Baratti, G. Mistretta "Analisi e modellazione dinamica di impianti di cattura postcombustione della CO2 che utilizzano solventi a base di ammine.", Università di Cagliari, RdS/2012/191
- M. Caboni, F. Ferrara, M. Fadda, C. Frau, E. Loria, D. Multineddu, A. Orsini, A. Pettinau "Messa a punto, modifiche e migliorie di un impianto prova da laboratorio per la cattura della CO2 e la rigenerazione termica dei solventi", Sotacarbo, RdS/2012/189
- F. Ferrara, M. Caboni, M. Fadda, C. Frau, E. Loria, D. Multineddu, A. Orsini, A. Pettinau "Valutazione e misura dei principali parametri di interesse in un impianto di prova da laboratorio per la cattura della CO_2 e la rigenerazione termica dei solventi liquidi a base di ammine", Sotacarbo, RdS/2012/224
- A. Di Nardo, G. Calchetti, E.Giulietti, C.Mongiello "Specifiche tecniche relative alla realizzazione di un bruciatore Trapped Vortex e alle modifiche dell'impianto MICOS", ENEA, RdS/2012/192
- E. Giulietti, C. Stringola "Modifiche all'impianto MICOS per testare bruciatori non convenzionali di tipo Trapped Vortex", ENEA, RdS/2012/233
- A. Di Nardo, G. Calchetti, C. Mongiello "Approfondimenti sul bruciatore Trapped Vortex. Analisi di sensibilità e scalatura del prototipo", ENEA, RdS/2012/193
- R. Camussi, T. Pagliaroli "Caratterizzazione aerodinamica e aeroacustica di bruciatori non convenzionali di tipo Trapped Vortex"; Università di Roma TRE, RdS/2012/194
- C. Stringola, M.Nobili, E.Giulietti, L.Pagliarori, S.Cassani "Upgrade S/W e H/W dell'impianto COMET-HP", ENEA, RdS/2012/196

- D. Cecere, E. Giacomazzi, F.R. Picchia, N.M.S. Arcidiacono, F. Donato "A numerical technique for treating complex geometries in compressibile staggered cartesian codes", ENEA, RdS/2012/197
- G. Rossi, B. Favini, F. Donato, E. Giacomazzi, F.R. Picchia, N.M.S. Arcidiacono "Solutori multi livello per simulazioni LES di flussi comprimibili e reattivi", ENEA-Università di Roma Sapienza, RdS/2012/198
- F. Donato, G. Rossi, B. Favini, E. Giacomazzi, D. Cecere, F.R. Picchia, N.M.S. Arcidiacono "LES simulation of a devolatilization experiment on the IPFR facility ", ENEA-Università di Roma Sapienza, RdS/2012/199
- A. Di Nardo, G. Calchetti "Ossicombustione di polverino di carbone. Studio CFD del reattore FO.SPER" ENEA, RdS/2012/202
- T.Faravelli, E. Ranzi, A. Frassoldati, T. Maffei "Modellazione della cinetica di ossidazione del char da carbone" Politecnico di Milano, RdS/2012/271
- V.Barbarossa, G.Vanga – Conversione di CO_2 in metano", ENEA, RdS/2012/203
- R. Baciocchi, G .Costa, M. Morone "Caratterizzazione dei residui dell'unità di gassificazione (di carbone o biomasse) del processo Zecomix e valutazione delle opzioni di riutilizzo dei residui, finalizzate alla riduzione dell'impatto ambientale del processo", Università di Roma Tor Vergata, RdS/2012/204
- V. Marchitelli, P. Deiana, C. Bassano, G. Girardi "Valutazione tecnico-economica dell'applicazione delle tecnologie CCS ad impianti termoelettrici a carbone ", ENEA, RdS/2012/205
- C. Frau, E. loria, A. Madeddu, M.F adda "Studio tecnico-economico sulla applicabilità del processo di co-gassificazione di carbone e biomasse con produzione di energia elettrica nel preesistente impianto di gassificazione Sotacarbo da 5 MWt", Sotacarbo, RdS/2012/206
- G. Calì, M. Caboni, F. Ferrara, M. Fadda "Studio e analisi progettuale per la realizzazione presso il C.R. Sotacarbo di un sistema di combustione a polverino di carbone integrato con sistemi di cattura della CO_2 postcombustione", Sotacarbo, RdS/2012/225
- A. Pettinu, E.L oria "Sviluppo delle attività propedeutiche alla realizzazione nel bacino del Sulcis di un impianto dimostrativo CCS alimentato a carbone", Sotacarbo, RdS/2012/226
- G. Cau, V. Tola "Modellazione e valutazione di processi di conversione termica del carbone basati su tecnologie USC e IGCC con trattamenti di purificazione degli effluenti gassosi e con rimozione della CO_2" Università di Cagliari, RdS/2012/207
- S. Lombardi, A. Annunziatella, S. Graziani, L. Ruggiero – Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO_2 e loro applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis", Università di Roma Sapienza, RdS/2012/208
- G. Girardi "La presenza italiana in campo internazionale per il coordinamento strategico e programmatico nel settore delle Tecnologie di Cattura e Stoccaggio della CO_2 (CCS) ", ENEA, RdS/2012/209

Progetto 3.1

Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi

- M. Presutto, S. Fumagalli "Sviluppo di nuovi metodi di misura e implementazione nazionale della legislazione europea sull'etichettatura e i requisiti minimi di efficienza energetica", ENEA, RdS/2012/074
- M. Presutto, S. Fumagalli, P. Pistochini, D. Scarano, V. Longoni "Rapporto sui risultati delle azioni svolte per la sorveglianza delle apparecchiature e sui laboratori di riferimento", ENEA, RdS/2012/075
- A. Portoraro, M. Badami "Analisi teorico-sperimentale di sistemi di micro-cogenerazione", Politecnico di Torino, RdS/2012/076
- G. Angrisani, M. Canelli, A. Rosato, C. Roselli, M. Sasso, S. Sibilio " Descrizione dei modelli dei sistemi fisici e degli algoritmi sviluppati per il controllo e l'ottimizzazione di micro_poligeneratori distribuiti. Validazione sperimentale ed analisi di sensitività", Università del Sannio, RdS/2012/077
- F. Ceravolo, B. Di Pietra, R. Iannucci, F. Margiotta, A. Pannicelli, G. Puglisi " Sviluppo di uno strumento per l'analisi di reti energetiche complesse nel settore civile", ENEA, RdS/2012/078
- D. Sbordone, L. Martirano, M. Falvo "Sviluppo e implementazione di moduli in ambiente Matlab-Simulink per la realizzazione di un simulatore di una rete energetica distribuita", Università di Roma Sapienza, RdS/2012/079
- E. Riva Sanseverino, M. L. Di Silvestre, R. Gallea, G. Zizzo, S. Favuzza, F. Massaro, G. Graditi , B. Di Pietra, I. Bertini " Modelli e strategie per la definizione di strumenti software per la simulazione integrata di distretti energetici in ambiente dedicato", Università di Palermo - ENEA , RdS/2012/080
- M.Beccali, V. Lo Brano, P. Finocchiaro, G. Ciulla "Studio di sistemi innovativi basati sul raffrescamento evaporativo indiretto per la climatizzazione dei Centri di Elaborazione Dati (CED)", Università di Palermo, RdS/2012/081
- L. De Santoli, F. Fraticelli, F. Giamminuti, G. Lo Basso, A. Spirito "Caratterizzazione di un sistema ibrido rappresentativo di una Micro–grid di prova per la valutazione delle funzionalità e potenzialità di software dedicati per la gestione energetica", Università di Roma Sapienza- CITERA, RdS/2012/082
- D. Forni, G. Tomassetti, D. Di Santo "Analisi del mercato della microcogenerazione in Italia con riferimento a dimensionamento, performance e gestione", FIRE, RdS/2012/083
- P. Pistochini, M. Presutto, V. Longoni "I laboratori per la market surveillance sulle Direttive Ecodesign ed Etichettatura Energetica per gli elettrodomestici del lavaggio", ENEA, RdS/2012/112

Progetto 3.2

Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici

- A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Fumagalli, G.Leonardi “Verso un indice di resa cromatica basato su un modello più efficace del sistema visivo”, Università di Milano, RdS/2012/272
- M. Barbalace, F. Gugliermetti, F. Bisegna, F. Lucchese “ Studio per la valutazione degli effetti della luce sugli esseri umani”, Università di Roma Sapienza, RdS/2012/273
- A. Roviello, A. Carella, F. Borbone, M. G. Maglione, P. Tassini, C. Minarini "Sintesi, deposizione e caratterizzazione di materiali polimerici barriera per acqua e/o ossigeno utilizzabili per l’incapsulamento di dispositivi per l’elettronica organica", Università di Napoli Federico II, RdS/2012/282
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante "Advance LED lighting design nell’illuminazione pubblica: Relazione tecnica Attività C.1 Ricerca progettuale PLUS SENSE", RdS/2012/274
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante ”Advance LED lighting design nell’illuminazione pubblica: Relazione tecnica attività C.2 . Ricerca progettuale PLUS ME", Politecnico di Milano , RdS/2012/275 e relativi allegati
- M. Rossi, D. Casciani, F. Musante "Advance LED Lighting design nell’illuminazione pubblica: Relazione tecnica Attività C.3. Ricerca e Misure su sorgenti e prototipi", Politecnico di Milano, RdS/2012/276 e relativi allegati
- G. Leonardi, S. Fumagalli, E. Rusconi “Il laboratorio di prova per le verifiche energetico-ambientali di sistemi di illuminazione "CORVO". Aggiornamento settembre 2012”, ENEA, RdS/2012/303
- M. Annunziato, G. Comodi, F. Lauro, C. Meloni, F. Moretti, S. Pizzuti, S. Romano “Sviluppo di una sperimentazione dimostrativa di “Smart Village” e metodi di progettazione", ENEA, RdS/212/053
- G. Comodi, A. Giantomassi, F. Polonara, S. Longhi, S. Pizzuti “Sviluppo di un approccio per la gestione ottimale di edifici: applicazione su Smart Village C.R. Casaccia”, Università Politecnica delle Marche, RdS/2012/054
- 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: applicazione su Smart Village C.R. Casaccia”, Politecnico di Torino-ENEA, RdS/2012/229
- 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”, Università Roma Tre, RdS/2012/230
- R. Giglioli, A. Chisena “Studio di strutture multifunzionali da installare in ambiente urbano come arredi attivi in una logica di smart cities”, Università di Pisa, RdS/2012/283
- M. Annunziato, P. Clerici Maestosi, S. Pizzuti “Città sostenibili e smart cities: partecipazione a network nazionali ed internazionali” , ENEA, RdS/2012/284
- M. Annunziato, S. Fumagalli, G. Giuliani, N. Gozo, C. Honorati Consonni, C. Meloni, R. Provaroni, A. Di Gregorio, R. Chierici, Progetto Lumière: Un’opportunità per gli enti locali di migliorare il servizio di pubblica illuminazione”, ENEA, RdS/2012/277
- M. Annunziato, C. Honorati Consonni, F. De Lia, S. Fumagalli, G. Giuliani, N. Gozo, G .Leonardi, C. Meloni, D. Santino, A. Scognamiglio, V. Albonico, G. Bianchi, F. Bucci, F. Peverelli, G. Secco, N. Sperotto, C. Birtolo, E. Corti, R. Lanciano, S.Mascia, C. Ferrari, A. Pascucci, G. Maraviglia, C. Banchetti, S. Conti, S. Aprea, B. Rizzuti, M.R. Longo, R. Clementoni, A. Rocchi, V. Menghini, M.R. Nuzzo, A. Pizzuti, C. Antonaci, A. Battistini, A. Di Gregorio, R. Chierici, C. Gallerini, V. Vangelista, P. Giannarelli, G. Belardi , F. Ciabatti, D.Poli, L. Perni “Linee guida: i fondamentali per una gestione efficiente degli impianti di pubblica illuminazione”, RdS/2012/278
- M. Annunziato, C. Honorati Consonni, S. Fumagalli, G. Giuliani, N. Gozo, G. Leonardi, V. Albonico, F. Bucci, G. Bianchi, F. Peverelli “Modello di audit energetico Lumière”, ENEA; RdS2012/279
- N. Gozo, A. Di Gregorio, R. Chierici “Sviluppo di strumenti di analisi e metodologie procedurali per l’innovazione nell’illuminazione pubblica. Il Modello di audit energetico”, CRIET, RdS/2012/280
- G. Rossi, P. Iacomussi, G. Scialpi, “Caratterizzazione di impianti di illuminazione ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto. Rapporto integrato con i risultati delle misurazioni dall’alto”, INRIM, RdS/2012/084
- P. Soardo “Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l’alto”, AIDI, RdS/2012/085
- L. Cellucci, L. Monti, F. Gugliermetti, F. Bisegna “Proposta di una procedura schematizzata per semplificare la redazione dei Piani Regolatori di Illuminazione Comunale (PRIC)”, Università di Roma Sapienza, RdS/2012/281

Progetto 3.3

Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

- G. Riva, G. Murano, V. Corrado, P. Baggio, G. Antonacci “Acquisizione e elaborazione dei dati climatici per le Province italiane e aggiornamento della UNI 10349”, Politecnica delle Marche, RdS/2012/106
- D. Iatauro, L. Terrinoni, P. Signoretti “Indice di Severità Climatica: classificazione dei comuni italiani ai fini della climatizzazione estiva degli edifici per la definizione delle zone climatiche estive”, ENEA , RdS/2012/107

- S. Ferrari, V. Zanotto “Analisi e valutazioni energetico – ambientali di un edificio-tipo riqualificato secondo il target NZEB”, Politecnico di Milano, RdS/2012/108
- “Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso residenziale e definizione dei consumi energetici elettrici e termici”, CRESME, RdS/2012/109
- W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, P. Conti, D. Della Vista, E. Schito, G. Fasano, P. Signoretti “Sviluppo di un Software applicativo per l’audit energetico negli edifici ad uso residenziale e terziario”, Università di Pisa - ENEA, RdS/2012/110
- L. Pagliano, S. Carlucci, P. Zangheri “Analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor”, Politecnico di Milano, RdS/2012/115
- L. Pagliano, P. Zangheri, “Sviluppo di una metodologia per l’individuazione dei requisiti di prestazione energetica ottimali in funzione dei costi”, Politecnico di Milano, RdS/2012/116
- M. Cellura, F. Guarino, V. Lo Brano, S. Longo, D. Panno “Design di edifici a energia netta zero alla luce della direttiva europea 2010/31/ce (EPBD recast) sulla prestazione energetica nell'edilizia”, Università di Palermo , RdS/2012/120
- S. Elia, E. Santini “Analisi di donsumo, elettrico e termico, del Centro Sportivo Giulio Onesti del Coni di Roma”, Università di Roma Sapienza, RdS/2012/111
- R. Paolini, T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini “Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all'ambiente urbano: variazione della riflettanza a seguito di invecchiamento naturale”, Politecnico di Milano, RdS/2012/113
- R. Paolini, T. Poli, M. Fiori, A.G. Mainini “Valutazione delle prestazioni di cool materials esposti all'ambiente urbano: sporcamento e invecchiamento accelerato”, Politecnico di Milano, RdS/2012/114
- E. Carniero, M. Zinzi, G. Fasano “Determinazione delle proprietà termofisiche di materiali ad elevata riflettanza solare per applicazioni a scala urbana: limiti e potenzialità”, ENEA, RdS/2012/227
- M. Perino, V. Serra, S. P. Corgnati, E. Fabrizio, F. Favoino, S. Fantucci “Minimizing temperature difference in HVAC systems for high energy efficiency in buildings”, Politecnico di Torino, RdS/2012/117
- M. Filippi, S. P. Corgnati, V. Fabi, N. Talà “Potenzialità e limiti applicativi dei modelli statistici e predittivi inversi per lo studio dei usi energetici totali negli edifici. (IEA – ECBCS Annex 53)”, Politecnico di Torino, RdS/2012/118
- M. Filippi, S. Paolo Corgnati, V. Fabi, N. Talà “Comportamento dell’utente: fattori influenzanti il consumo energetico e modelli descrittivi”, (IEA-ECBCS, Annex 53)”, Politecnico di Torino, RdS/2012/119

Progetto 3.4
Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

- N. Calabrese A. Fanchiotti “Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione dell’innovativo impianto di solar heating and cooling realizzato a servizio dell’edificio F92”, ENEA - Università di Roma TRE, RdS/2012/122
- N. Calabrese, G. Oliveti, V. Marinelli, R. Mastrullo, A. W. Mauro “Messa in funzione, analisi sperimentale e caratterizzazione della pompa di calore a CO_2”, ENEA - Universita’ della Calabria - Università di Napoli Federico II, RdS/2012/123
- N. Calabrese R. Mastrullo, A. W. Mauro “Progettazione costruttiva di un prototipo di pompa di calore a CO_2 (R744) invertibile del tipo aria-aria e realizzazione della facility di prova”, ENEA - Università di Napoli Federico II, RdS/2012/124
- R. Lazzarin, M. Noro, F. Busato “Progettazione di un serbatoio di accumulo a cambiamento di fase”, Università di Padova, RdS/2012/125
- M. Beccali, V. Lo Brano, P. Finocchiaro, G. Ciulla, M. Cellura, F. Guarino, S. Longo “Studio e progettazione di un sistema di smaltimento statico del calore”, Università di Palermo, RdS/2012/126
- A. Mariani, F. Quadrini “Analisi sperimentale collettori solari termici ad heat pipe”, ENEA - Università di Cassino e del Lazio Meridionale, RdS/2012/127
- G. Boccardi, N. Calabrese, R. Trinchieri, L. Saraceno “Realizzazione di un prototipo di macchina frigorifera caldo/freddo dedicata al settore alimentare”, ENEA, RdS/2012/128
- G. Corallo, A. Simonetti “Realizzazione di un impianto di solar cooling a servizio di una serra per colture intensive”, ENEA, RdS/2012/129
- V. Sabatelli, D. Marano, G. Braccio, A. Ebolese, P. Colucci “Sviluppo e caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling”, ENEA, RdS/2012/130

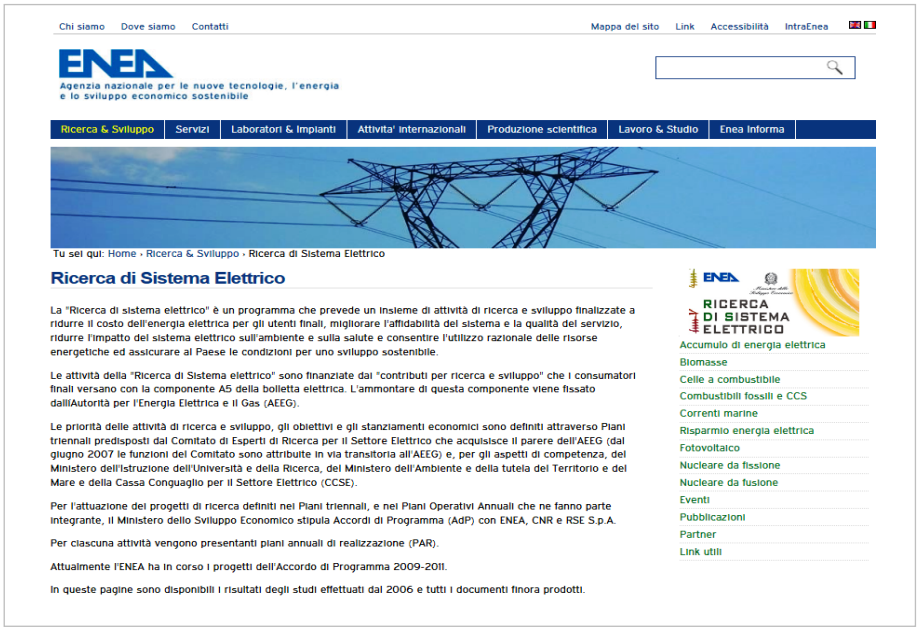
Progetto 3.5
Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

- F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale “Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive”, ENEA, RdS/2012/087
- R. Roncella, F. Baronti, G. Fantechi, R. Saletti “Sviluppo di un Battery Management System (BMS) con bilanciamento attivo per sistema batterie al LiFePO4 da 48 Vn - 100 Ah”, Università di Pisa, RdS/2012/088

- R. Roncella, F. Baronti, G. Fantechi, R. Saletti “Progettazione definitiva del Battery Management System (BMS) per batterie di avviamento e trazione non automotive”, Università di Pisa, RdS/2012/089
- V. Sglavo, F. Vellucci “Prova vita di batterie piombo acido con e senza livellamento del carico”, ENEA, RdS/2012/121
- M. Bertoluzzo, G. Buja “ Progetto di un caricabatteria di bordo derivato da un azionamento di trazione “ , Università di Padova, RdS/2012/090
- A. Ometto “Progetto di un convertitore AC/DC per stazioni di ricarica in CC”, Università dell’Aquila, RdS/2012/091
- G. Pede, E. Rossi, C. Villante “Studio di una stazione di ricarica in c.c per linea di trasporto pubblico urbano”, ENEA, RdS/2012/092
- M. Cellura, S. Longo, A. Orioli, D. Panno “Life Cycle Assessment di sistemi per le auto elettriche di sistemi per auto elettriche”, Università di Palermo , RdS/2012/093
- P. Masoni, S. Scalbi “Analisi LCA di materiali ultraleggeri per il trasporto: Aluminum foam sandwich”, ENEA, RdS/2012/094
- C. Di Bari “Hazard evaluation di celle Litio-ione ed elaborazione di un modello di raccolta dati per Safety Review di sistemi di accumulo”, ENEA, RdS/2012/095
- C. Di Bari “Studi preliminari alla progettazione di un laboratorio di verifiche strumentali per la sicurezza”, ENEA, RdS/2012/096
- R. Montanari, M. E. Tata, N. Ucciardello “Studio dei meccanismi di formazione del bonding metallurgico pelle-core e predizione delle caratteristiche morfologiche delle schiume mediante analisi con reti neurali”, Università di Roma Tor Vergata, RdS/2012/097
- G. Barbieri , F. Cognini, M. Moncada “Processi di fabbricazione di profilati estrusi rinforzati con schiuma metallica”, ENEA , RdS/2012/098
- G. Barbieri, F Cognini, G. De Santis “Procedimenti e progettazione di apparecchiature prototipali per la giunzione metallurgica pelle core per la realizzazione di AFS”, ENEA, RdS/2012/099
- E. Bemporad, M: Sebastiani ”Analisi locale a risoluzione sub-micrometrica degli stress residui e correlazione con il comportamento a rottura macroscopico di AFS”, Università di Roma Tre, RdS/2012/100
- M. Moncada, G. Barbieri, A. Tatì, U. De Angelis “Sviluppo di metodologie di controllo NDT su componenti saldati e correlazione con le caratteristiche meccaniche”, ENEA, RdS/2012/101
- G. Barbieri, F. Cognini, P. Colucci, M.B. Alba “Fabbricazione e qualificazione di componenti saldati e progettazione di componenti in AFS”, ENEA, RdS/2012/102
- L. Carrino, M. Durante “Tecnologie innovative per la realizzazione di compositi a matrice polimerica con rinforzo in fibre naturali “, Università di Napoli Federico II, RdS/2012/103
- C. Massaro, R. Terzi “Nuovi materiali biocompositi ottenuti mediante l’utilizzo di tessuti commingled a base PLA/fibre di lino e di canapa”, ENEA, RdS/2012/104
- G. Barbieri, M. Schwarz “Tecnologie di scale-up del processo di produzione di materiali ibridi metallo polimero basati su svere/grani cavi“, ENEA, RdS/2012/105

Tutti i documenti in elenco sono disponibili sul sito ENEA all’indirizzo:

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/ricerca-di-sistema-elettrico



Abbreviazioni ed acronimi

AC	Alternating current
ACS	Acqua calda sanitaria
AdP	Accordo di Programma
AEI	Agenzia Internazionale dell'Energia
AFS	Foam aluminium sandwich
AIRU	Associazione Italiana Riscaldamento Urbano
AIT	Austrian Institute of Technology
ALFRED	Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator
AoC	Agreement of Collaboration
ASTM	American Society for Testing and Materials
AuNP	Nanoparticelle di oro
BA	Broader Approach
bbl	Barili di petrolio
BDBE	Beyond Design Basis Event
BMS	Battery Management System
BT	Bassa tensione
CAES	Compressed Air Energy Storage
CALEF	Consorzio per la ricerca e lo sviluppo delle applicazioni industriali laser e del fascio elettrico e dell'ingegneria di processo , materiali , metodi e tecnologie di produzione
CC	Corrente costante
CCS	Carbon Capture and Storage
CCT	Clean Coal Technologies
CCT	Temperature di colore correlata
CE	Commissione Europea
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CECED	Comitato Europeo dei Costruttori di Apparecchi Domestici
CEI	Comitato Elettrotecnico Italiano
CERN	Organizzazione Europea di Ricerche Nucleari
CET	Containment Event Tree
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFM	Containment Failure Modes
CHP	Combined Heat Power
CIRCE	CIRColazione Eutettico
CIRTEN	Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare
CIS	Rame (Cu)- Indio (In)-Selenio (Se)
CNR	Consiglio Nazionale dele Ricerche
COB	Chip on board
COE	Costo dell'elettricità
COP	Coefficient Of Performance
COV	Composti organici volatili
CPU	Central processing unit
CR	Centro ricerche
CRESCO	Centro Computazionale di Ricerca sui Sistemi Complessi
CRI	Color rendering index
CRRC	Cool Roofing Rating Council
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Forum
CTF	Centrale termo frigorifera
CTI	Comitato Termotecnico italiano
CTL	Coal To Liquid
CV	Potemziale costante
CVD	Chemical vapor deposition
CVI	Chemical Vacuum Infiltration
CZTS	Cu_2ZnSnS_4
D.lgs	Decreto leslislativo
DA	Digestione Anaerobica
DC	Direct current
DI	Dispositivo di interfaccia

DEC	Dietilene carbonato
DET	Decomposition Event Tree
DHR	Decay Heat Removal
DIC	Digital Image Correlation
DOD	Profondità di carica
DoE	Department of Energy
DOE	Design of Experiment
DP	Doppio pancake
dpa	Displacement per atom
DPR	Decreto del Presidente della Repubblica
DSM	Demand Side Management
EBT	Emergency Boration Tank
EBW	Electron Beam Welding
EC	Etilen carbonato
ECMWF	Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
EER	Energy Efficiency Ratio
EERA	European Energy Research Alliance
EFTEM	Microscopia Elettronica in Trasmissione Filtrata in Energia
ELSY	European Lead cooled SYstem
ELTL	EVEDA Lithium Test Loop
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia, e lo sviluppo economico sostenibile
ENSREG	European Nuclear Safety Regulators Group
EPR	European Pressurized Reactor
EQE	Efficienza quantica esterna
ESCo	Energy Service Company
ESFRI	Electrical Safety Foundation International
ESNII	European Sustainable Nuclear Industrial Initiative
ET	Event Tree
EURATOM	European Atomic Energy Community
EVEDA	Engineering Validation and Engineering Design Activities
F4E	Fusion for Energy
FAP	Ferro ammonio fosfato
FAST	Fusion Advanced Study Torus
FDS	Fast Disconnecting System
FEM	Metodo agli elementi finiti
FER	Fonti energetiche rinnovabili
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope.
FF	Fill Factor (fattore di riempimento)
FIB	Focused Ion Beam
FORSU	Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
FV	Fotovoltaico
GD	Generazione distribuita
GDOES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
GESSYCA	GEneratore Sperimentale di SYngas da CArbone
GHP	Pompa di calore a gas
GHSP	Gas Hourly Space Velocity,
GIF	Generation IV International Forum
GIS	Geographic Information System
GNEP	Global Nuclear Energy Partnership
GO	Ossido di grafite
GSE	Gestore Servizi Energetici
GV	Generatore di vapore
GWP	Potenziale di riscaldamento globale
HPLC/IC	High Performance Liquid Chromatography / Ion Chromatography
HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy
HTMR	Hard To Measure Radionuclides
IAEA	International Atomic Energy Agency
IAM	Incidence angle modifier
IC	Carbonio inorganico
ICE	Integral Circulation Experiment

ICT	Information and Communication Technology
IEA	International Energy Agency
IEC	Commissione Elettrotecnica Internazionale
IEP	Punto isoelettrico
IFERC	International Framework for Nuclear Energy Cooperation
IFMIF	International Fusion Material Irradiation Facility
IFRF	International Flame Research Foundation
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IGBT	Insulated Gated Bipolar Transistor
INPRO	International Project on Innovative Nuclear Reactors
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
IRIS	International Reactor Innovative an Secure
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ISO	International Organization for Standardization
ISWEC	Inertial Sea Wave Energy Converter
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
ITO	Indium Tin Oxide
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JHR	Jules Horowitz Reactor
JPNM	Joint Programme on Nuclear Materials
JT-60SA	JAEA Tokamak 60 Super Advanced
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KPI	Key Performance Indicator
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCA	Life Cycle Assessment
LCF	Load-Cool-Fracture
LED	Light emitting diode
LES	Large Eddy Simulation
LFR	Lead Fast Reactor
LIFUS	LIthium FUSion
LiTFSI	Litio bis(TriFluorometanSulfonil)Immide
LP-CVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
LVFRT	Low Voltage Fault Ride Through
LWR	Light Water Reactor
MC	Mitigation cost
MFTM	Medium Flux Test Module
MIBAC	Ministero per i Beni e le Attività Culturali
MITgcm	Massachusetts Institute of Technology general circulation model
MIUR	Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della RIcerca
MOCVD	Metal organic chemical vapor deposition
MOX	Combustibile a Ossidi Misti
MP	Metallurgia delle polveri
MSE	Ministero dello Sviluppo Economico
MT	Media tensione
NACIE	Natural Circulation Experiment
NDT	Non Destructive Testing
NEA	Nuclear Energy Agency
NESA	Nuclear Energy System Assessment
NETL	National Energy Technology Laboratory (DoE USA)
NZEB	Nearly Zero Energy Buildings
ODESSE	Optimal design fir smart energy
ODP	Potenziale di riduzione dell'ozono
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLED	Organic light-emitting diode
ORC	Organic Rankine Cycle
OWC	Oscillating Water Column
PA	Procurement Arrangement
PAEE	Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PCM	Phase Change Material
PDS	Plant Damage States
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PEG	Polietilenglicole

PEN	Polietilenenaftalato
PES	Primary Energy Saving
PLC	Power Line Communication
PS	Silicio policristallino
PSA	Pressure Swing Adsorption
PS-b-PMMA	Poli(stirene-b-metilmetacrilato)
PTFE	Politetratluorottilene (Teflon)
PYR_1	*N*-metilpirrolidina
PTS	Pressurized Thermal Shock
PWM	Pulse Width Modulation
PWR	Pressurized water reactors
PYR13TFSI	(*N*-metil-*N*-propil-pirrolidinio bis(TriFluorometanSulfonil)Immide)
RCS	Reactor Coolant System
RdS	Ricerca di Sistema
RELAP	Reactor Excursion and Leak Analysis Program
REWEC3	Resonant Wave Energy Converter
RGO	Ossido di grafite ridotto
RIE	Reactive Ion Etch
RMS	Rugosità media della superficie del fim
RSE	Ricerca Sistema Energetico
Rsh	Sheet Resistance
SAM	Self Assessment Manikin
SCW	Supercritical Water
SEARCH	Safe ExploitAtion Related CHemistry for HLM reactors
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SEM	Microscopia a scansione elettronica
SET-Plan	Strategic Energy Technology Plan
SEU	Sistema di efficienza di utenza
SFR	Sodium fast reactor
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
SMR	Small medium reactor
SNG	Gas naturale sintetico
SNU	Switching Network Unit
SPES	Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza
SVEM	Struttura Viaria Ecosostenibile Multifunzionale
SWAN	Simulating WAves Nearshore
TA	Target Assembly
TC	Test cell
TCO	Ossido trasparente e conduttivo
TEE	Titoli di Efficienza Energetica (Certificati Bianchi)
TEM	Transmission Electron Microscopy
TF	Campo toroidale
TGA	Analisi termogravimetria
TIR	Tasso interno di rendimento
TOC	Carbonio organico totale
TPL	Trasporto pubblico locale
TS	Specifiche tecniche
UE	Unione Europea
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
USC	Ultrasupercritico
V2G	Vehicle-to-Grid
VALCHIRIA	VALorizzazione CHar: Impianto RIcerche Avanzate
VC	Composti volatili
WAM	WAve Model
WPC	Wood Polymer Composite
WPS	Warm Pre-Stressing
WR	White Rot
X-EDS	X- Energy dispersion spectroscopy
XRD	X-Ray Diffraction

Edito dall'ENEA

Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

www.enea.it

Copertina: Bruno Giovannetti

Novembre 2012